

**ECOLE DOCTORALE SYSTEMES INTEGRES EN BIOLOGIE, AGRONOMIE,  
GEOSCIENCES HYDROSCIENCES ET ENVIRONNEMENT**

**Doctorat du Centre International d'études supérieures en sciences  
agronomiques**

**Biologie Intégrative des Plantes**

**THESE**

**Présentée et soutenue publiquement par**

**NDO Eunice Golda Danièle**

**Évaluation des facteurs de risque épidémiologique de  
la phaeoramulariose des agrumes dans les zones  
humides du Cameroun.**

*Directeur de Thèse: Jean-Loup NOTTEGHEM*

*Co-Directeur de thèse: Christian CILAS*

**Soutenue le 12 décembre 2011**

**Jury :**

M. CILAS Christian, Chercheur au CIRAD

Mme DESPREZ-LOUSTAU Marie-Laure, Chercheur à l'INRA

Mme NEEMA Claire, Professeur à AgroParisTech

M. NOTTEGHEM Jean-Loup, Professeur à Montpellier SupAgro

M. SACHE Ivan, Chercheur à l'INRA

Examineur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Rapporteur



UR 106 Bioagresseurs  
Analyse et gestion des risques









**ECOLE DOCTORALE SYSTEMES INTEGRES EN BIOLOGIE, AGRONOMIE,  
GEOSCIENCES HYDROSCIENCES ET ENVIRONNEMENT**

**Doctorat du Centre International d'études supérieures en sciences  
agronomiques**

**Biologie Intégrative des Plantes**

**THESE**

Présentée et soutenue publiquement par

**NDO Eunice Golda Danièle**

**Évaluation des facteurs de risque épidémiologique  
de la phaeoramulariose des agrumes dans les zones  
humides du Cameroun.**

*Directeur de Thèse: Jean-Loup NOTTEGHEM*

*Co-Directeur de thèse: Christian CILAS*

Soutenue le 12 décembre 2011

**Jury :**

M. CILAS Christian, Chercheur au CIRAD  
Mme DESPREZ-LOUSTAU Marie-Laure, Chercheur à l'INRA  
Mme NEEMA Claire, Professeur à AgroParisTech  
M. NOTTEGHEM Jean-Loup, Professeur à Montpellier SupAgro  
M. SACHE Ivan, Chercheur à l'INRA

Examineur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Rapporteur



UR 106 Bioagresseurs:  
Analyse et gestion des risques







*A*

*Mon époux Bruno MFOU'DU MFOU'DU, et à nos enfants  
Maeva, Johanne, Lorine et Curtis*





## **Remerciements**

Cette thèse a été réalisée avec l'appui de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD), du centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), de la Coopération Française au Cameroun, du Pôle de Compétence en Partenariat (PCP) Grand Sud Cameroun et du projet de Renforcement des Partenariats dans la Recherche Agronomique au Cameroun (REPARAC).

Ce travail a été effectué sous la direction de Jean-Loup NOTTEGHEM et Christian CILAS, et sous l'encadrement de BELLA MANGA. Je tiens sincèrement à les remercier pour tous les efforts consentis et pour l'expérience qu'ils ont bien voulu partager avec moi afin de donner un sens à ce travail.

Je tiens également à remercier Yvan SACHE et Marie-Laure DESPREZ-LOUSTAU pour avoir accepté de consacrer de leur temps à l'évaluation de cette thèse. Merci à Claire NEEMA pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je souhaite aussi remercier Michel NDOUMBE NKENG, Sali NDINDENG ATANGA, Lucien BIDZANGA NOMO, Raphael AMBASSA KIKI, Michel HAVARD, Marie-Ange NGO BIENG, Natacha MOTISI et Cynthia GIDOIN pour leur énorme contribution à ce travail.

Les techniciens du Programme Fruits ont de bon cœur bravé les intempéries et abandonné leurs familles pour m'accompagner dans la réalisation des enquêtes et expérimentations. Je pense ici à Maurice MIMBIMI NGBWA, Joseph Marie NOUGA, et Dieudonné. EYENGA EYENGA. Je pense également à notre chauffeur, Jean Paul NAFACK qui, au-delà de son travail, n'a pas hésité à nous apporter un coup de main dans la réalisation de certaines tâches. Je dis à tous un grand merci. Merci également à Zacharie TECHOU pour l'aide apportée dans la réalisation de mes travaux en laboratoire.

Ce travail n'aurait probablement pas abouti sans l'aide et la bonne volonté de tous les planteurs qui ont mis leurs parcelles à notre disposition pour la réalisation de nos travaux. Ma gratitude va à l'endroit de MM EBANJA, BEPE, OTTOKO, VEJAI, NLEMFON et Mme BETELI.

Que tous les chercheurs de l'IRAD et du CIRAD qui m'ont soutenue par leurs conseils et encouragements notamment Noé WOIN, Joseph MOUEN BEDIMO, Simon ZOK, Salomon NYASSE, Jean NJOYA, Nérée ONGUENE AWANA, Steve YONG SULEM, Regis BABIN Fabienne RIBEYRE et Nazaire NKOUKA trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je ne saurais oublier Claudie GOBART et Romain FERDINAND qui ont contribué à rendre mon quotidien à Montpellier plus agréable.

Je dis également un grand merci à ma maman Mme NDO Brigitte Cécile qui a veillé sur ma famille pendant mes multiples absences et m'a toujours donné la force et le courage d'aller de l'avant. Je remercie tous les membres des familles NDO ZO'O et MFOU'OU qui par leur soutien, leurs prières et encouragements ont contribué à la réussite de ce travail.

Je dis toute ma reconnaissance à Bruno MFOU'OU MFOU'OU, mon époux pour son amour, sa patience et son soutien indéfectible et à mes quatre enfants qui ont accepté mes multiples absences et m'ont toujours témoigné leur amour.

Que tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidée dans la réalisation de ce travail trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.



## ***Sommaire***





# Sommaire

<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>17</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>23</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE 1 : L'HOTE, L'AGENT PATHOGENE, LA MALADIE .....</b>	<b>37</b>
1.1    LES AGRUMES.....	37
1.1.1 <i>Origine et distribution géographique.....</i>	37
1.1.2 <i>Taxonomie .....</i>	37
1.1.3 <i>Ecologie et phénologie des agrumes.....</i>	38
1.1.4 <i>Production des agrumes dans le monde.....</i>	39
1.1.5 <i>Production des agrumes au Cameroun.....</i>	41
1.2    CONTRAINTES DE LA PRODUCTION DES AGRUMES AU CAMEROUN .....	43
1.2.1 <i>Les principaux ravageurs.....</i>	43
1.2.2 <i>Les principales maladies fongiques .....</i>	44
1.3    LA PHAEORAMULARIOSE DES AGRUMES .....	45
1.3.1 <i>Origine et distribution géographique.....</i>	45
1.3.2 <i>Symptômes et dégâts.....</i>	45
1.3.3 <i>Agent pathogène.....</i>	48
1.3.4 <i>Biologie du champignon.....</i>	49
1.3.5 <i>Epidémiologie.....</i>	49
1.3.6 <i>Sensibilité variétale .....</i>	52
1.3.7 <i>Méthodes de lutte .....</i>	53
<b>CHAPITRE 2 : ILLUSTRATION DE LA COMPOSITION ET DE LA STRUCTURE DES PEULEMENTS A BASE D'AGRUMES .....</b>	<b>57</b>
2.1    INTRODUCTION.....	57
2.2    MATERIEL ET METHODES .....	58
2.2.1 <i>Présentation Sites et parcelles .....</i>	58
2.2.2 <i>Cartographie des parcelles .....</i>	58
2.2.3 <i>Constitution des sous-populations d'arbres.....</i>	59
2.2.4 <i>Analyse de la structure spatiale des sous-populations.....</i>	59
2.2.5 <i>Hétérogénéité et correction des effets de bord.....</i>	61
2.3    RESULTATS .....	61
2.3.1 <i>Composition de chaque sous population.....</i>	61
2.3.2 <i>Représentation graphique des sous-populations.....</i>	62
2.2.3 <i>Analyse de la structure de chaque sous-population.....</i>	65
2.3    DISCUSSIONS .....	68
2.3.1 <i>Représentation graphique des sous-populations.....</i>	68
2.3.2 <i>Analyse de la structure de chaque sous-population.....</i>	68
2.3.3 <i>Limites de la méthode.....</i>	69
<b>CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES FACTEURS ASSOCIES AU DEVELOPPEMENT DE LA PHAEORAMULARIOSE DANS LES ZONES HUMIDES DU CAMEROUN .....</b>	<b>73</b>
PRESENTATION DE L'ETUDE .....	73
ARTICLE: ALTITUDE, TREE SPECIES AND SOIL TYPE ARE THE MAIN FACTORS INFLUENCING THE SEVERITY OF PHAEORAMULARIA LEAF AND FRUIT SPOT DISEASE OF CITRUS IN THE HUMID ZONES OF CAMEROON .....	75

## **CHAPITRE 4 : ANALYSE DE L'IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE COMPORTEMENT DE DIFFERENTES VARIETES D'AGRUMES FACE A LA PHAEORAMULARIOSE..... 91**

4.1	INTRODUCTION.....	91
4.2	MATERIEL ET METHODES .....	92
4.2.1	Choix des sites et parcelles .....	92
4.2.2	Choix des espèces/variétés.....	93
4.2.3	Dispositif expérimental/Description des parcelles .....	94
4.2.4	Collecte des données .....	98
4.2.5	Analyses statistiques.....	100
4.3	RESULTATS .....	101
4.3.1	Description des conditions climatiques et géographiques.....	101
4.3.2	Propriétés du sol .....	102
4.3.3	Caractérisation de la Phaeoramulariose dans les différents sites de l'étude....	107
4.4	DISCUSSIONS .....	120
4.4.1	Conditions climatiques, géographiques et édaphiques .....	120
4.4.2	Comparaison de la sévérité de la maladie entre les variétés d'agrumes dans chaque site de l'étude.....	120
4.4.3	Comparaison de la sévérité de la maladie entre les sites pour chaque variété.	121

## **CHAPITRE 5 : EFFET DE L'OMBRAGE SUR L'INTENSITE DE LA MALADIE ET DISTRIBUTION SPATIALE DE LA PHAEORAMULARIOSE..... 127**

5.1	INTRODUCTION.....	127
5.1	MATERIEL ET METHODES .....	128
5.1.1	Choix des sites et parcelles .....	128
5.1.2	Dispositif expérimental/Description des parcelles .....	128
5.1.3	Collecte des données .....	130
5.1.4	Analyses statistiques.....	131
5.2	RESULTATS .....	134
5.2.1	Comparaison des sévérités de la maladie par type d'ombrage .....	134
5.2.2	Représentation graphique des variables de sévérité de la maladie par type d'ombrage .....	136
5.2.3	Analyse de l'effet de l'ombrage et de la date d'observation sur l'intensité de la phaeoramulariose dans la parcelle.....	138
5.2.4	Représentation graphique des résidus après analyse des variances .....	139
5.2.5	Analyse spatiale des résidus.....	140
5.3	DISCUSSIONS .....	143
5.3.1	Effet de l'ombrage.....	143
5.3.2	Distribution spatiale de la phaeoramulariose .....	144

## **CHAPITRE 6 : ELABORATION D'UN MODELE DE PREDICTION POUR LA GESTION DU RISQUE..... 147**

6.1	INTRODUCTION.....	147
6.2	MATERIEL ET METHODES.....	147
6.2.1	Acquisition des données .....	147
6.2.2	Analyse de Régression PLS.....	148
6.3	RESULTATS .....	149
6.3.1	Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des orangers.....	149
6.3.2	Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des pomélos.....	154
6.3.3	Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des satsumas.....	159

6.4	DISCUSSIONS .....	164
6.4.1	<i>Facteurs du sol.....</i>	164
6.4.2	<i>Facteurs climatiques et altitude .....</i>	165
6.4.3	<i>Système de production.....</i>	166
<b>CHAPITRE 7 : SYNTHÈSE, CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>171</b>
7.1	INTRODUCTION .....	171
7.2	PRINCIPAUX RESULTATS.....	172
7.2.1	<i>Illustration de la composition et de la structure des peuplements à base d'agrumes.....</i>	172
7.2.2	<i>Identification des facteurs associés au développement de la phaeoramulariose dans les zones humides du Cameroun.....</i>	172
7.2.3	<i>Evaluation de l'interaction facteurs abiotiques-variétés sur l'incidence de la maladie.....</i>	173
7.2.4	<i>Evaluation de la nutrition azotée sur l'incidence de la maladie.....</i>	174
7.2.5	<i>Evaluation de l'ombrage et répartition spatiale de la maladie .....</i>	175
7.2.6	<i>Variables de prédiction pour la gestion du risque.....</i>	175
7.3	CONSEQUENCES SUR LA PREDICTION ET LA GESTION DE LA MALADIE .....	177
7.3.1	<i>Influence des facteurs pédoclimatiques.....</i>	177
7.3.2	<i>Influence de la répartition spatiale de la maladie et du système de production</i>	178
7.3.3	<i>Influence de l'ombrage.....</i>	178
7.4	CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	179
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>183</b>
<b>ANNEXE : EFFETS DE DIFFÉRENTES APPLICATIONS DE L'URÉE SUR L'INCIDENCE DE LA PHAEORAMULARIOSE .....</b>		<b>199</b>





## ***Liste des Tableaux***



## Liste des Tableaux

**Tableau 2.1.** Composition en nombre d'espèces de la parcelle de Kumba.

**Tableau 2.2.** Composition en nombre d'arbres et espèces de la parcelle de Bokito.

**Article- Table 1.** List of variable describing citrus trees and their environment.

**Article- Table 2.** Phaeoramularia leaf and fruit spot disease (PLFSD) severity on leaves and fruits between 2005 and 2006 in different sites of citrus production basins in humid zones of Cameroon.

**Article-Table 3.** Variables significantly associated with Phaeoramularia leaf and fruit spot disease of citrus selected from data collected between 2005 and 2006 in the humid zones of Cameroon.

**Tableau 4.1.** Plan des parcelles d'essai des effets environnementaux sur le niveau de résistance/sensibilité de différents groupes d'agrumes à la phaeoramulariose de 2006.

**Tableau 4.2.** Plan de la parcelle d'essai des effets environnementaux sur le niveau de résistance/sensibilité de différents groupes d'agrumes à la phaeoramulariose (Foumbot 2002).

**Tableau 4.3.** Récapitulatif du dispositif expérimental dans les différentes parcelles affectées à l'essai d'analyse de l'impact des facteurs environnementaux sur le comportement de différentes espèces de Citrus vis-à-vis de la phaeoramulariose.

**Tableau 4.4.** Description des variables de sol étudiées.

**Tableau 4.5.** Altitude et Coordonnées géographiques des différents sites.

**Tableau 4.6.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site d'Ekona pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.7.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Foumbot pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.8.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Njombé pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.9.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Nkolbisson.

**Tableau 4.10.** Comparaison de trois variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Bokito pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.11.** Comparaison de quatre variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Boumnyebel pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.12.** Comparaison de deux variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Jakiri pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.13.** Comparaison de trois variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Kumba pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.14.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur orangers pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.15.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers satsuma pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.16.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers beauty pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.17.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur lime tahiti pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.18.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur pomélos pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.19.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur orangers pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.20.** Comparaison de deux sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers madagascar pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.21.** Comparaison de deux sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers satsuma pendant trois dates d'observation.

**Tableau 4.22.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur pomélos pendant trois dates d'observation.

**Tableau 5.1.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de mandariniers par type d'ombrage pour 4 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

**Tableau 5.2.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur fruits de mandariniers par type d'ombrage pour 3 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

**Tableau 5.3.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de pomélos par type d'ombrage pour 2 dates d'observation dans la parcelle de Foubot.

**Tableau 5.4.** Paramètres significativement associés à la sévérité de la phaeoramulariose dans la parcelle de Foubot.

**Tableau 5.5.** Paramètres descriptifs des semivariogrammes et statistiques des modèles obtenus pour les résidus du nombre moyen de lésions par feuille (Nles), du nombre moyen de lésions par feuille malade (Nlesm) et du pourcentage de feuilles malades(Pom) des plants de pomélo pendant les deux dates d'observation dans la parcelle de Foubot.

**Tableau 4.23.** Indice de qualité du modèle ( $Q^2$ ) par composante et par variable expliquée sur orangers.

**Tableau 4.24.** Pouvoir explicatif des composantes th du modèle de régression PLS sur orangers.

**Tableau 4.25.** Coefficients de régression des variables environnementales centrées-réduites pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur oranger.

**Tableau 4.1.** Récapitulatif du dispositif expérimental dans les différents sites d'essai de l'effet de différentes applications de l'urée sur l'incidence de la phaeoramulariose.

**Tableau 4.2.** Matrice de corrélation entre les 3 variables de la maladie.

**Tableau 4.3.** Incidence de la Phaeoramulariose pour chacun des trois traitements de nutrition azotée dans les 5 sites d'étude.

**Tableau 5.1.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de mandariniers par type d'ombrage pour 4 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

**Tableau 5.2.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur fruits de mandariniers par type d'ombrage pour 3 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

**Tableau 5.3.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de pomélos par type d'ombrage pour 2 dates d'observation dans la parcelle de Foubot.

**Tableau 6.1.** Indice de qualité du modèle ( $Q^2$ ) par composante et par variable expliquée sur orangers.

**Tableau 6.2.** Pouvoir explicatif des composantes th du modèle de régression PLS sur orangers.

**Tableau 6.3.** Coefficients de régression des variables environnementales centrées-réduites pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur orangers.

**Tableau 6.4.** Indice de qualité du modèle ( $Q^2$ ) par composante et par variable expliquée sur pomélos.

**Tableau 6.5.** Pouvoir explicatif des composantes th du modèle de régression PLS sur pomélos.

**Tableau 6.6.** Coefficients de régression des variables environnementales centrées-réduites pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur pomélos.

**Tableau 6.7.** Indice de qualité du modèle par composante et par variable expliquée sur mandariniers pomélos.

**Tableau 6.8.** Pouvoir explicatif des composantes th du modèle de régression PLS sur satsumas.



**Tableau 6.9.** Coefficients de régression des variables environnementales centrées-réduites pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur satsumas.

## ***Liste des Figures***



## Liste des Figures

**Figure 1.1.** Principaux pays producteurs d'agrumes dans le monde.

**Figure 1.2.** Répartition géographique de la production d'agrumes destinés au marché de fruits frais pendant la période 2000-2004 (Source : Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement à partir des données de la FAO).

**Figure 1.3.** Système de culture d'agrumes dans un jardin de case (a), dans un verger pur (b), dans une parcelle agroforestière associés aux caféiers et autres fruitiers avec des cultures vivrière à la lisière (c) et à l'intérieur de la parcelle (d).

**Figure 1.4.** Répartition géographique de la phaeoramulariose des agrumes et années de confirmation de la présence de la maladie pour chaque pays (Adapté de Kuate 1998, Seif 2002, EPPO, 2006 ; Harling et al 2010).

**Figure 1.5.** Lésions causées par *P. angolensis* sur fruits de pomélo (a), oranger (b) et limettier (c) dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.

**Figure 1.6.** Lésions causées par *P. angolensis* sur jeunes feuilles (a) et sur feuilles âgées d'oranger (b) dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.

**Figure 1.7.** Perforation du limbe d'un pomélo(a) et éclatement du fruit d'oranger (b) suite à une attaque par *P. angolensis* dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.

**Figure 1.8.** Conidies de *P. angolensis* (Source Yesuf, 2002).

**Figure 1.10.** Représentation schématique de l'épidémie de phaeoramulariose (Adapté de Rapilly, 1991).

**Figure 2.1.** Illustration des structures spécifiques régulière, aléatoire et agrégée (a) ; Courbes de la fonction Ripley  $L(r)$  pour les structures régulière, aléatoire et agrégée (b) (d'après Goreaud, 2000).

**Figure 2.2.** Représentation graphique de la disposition des espèces dans la sous-population d'agrumes de la parcelle de Kumba.

**Figure 2.3.** Représentation graphique des sous-populations de forestiers (a), bananiers (b), palmiers (c), fruitiers (d), agrumes (e) et cacaoyers (f) dans la parcelle de Bokito.

**Figure 2.4.** Représentation de l'ensemble des sous-populations dans la parcelle de Bokito.

**Figure 2.5.** Représentation graphique de la parcelle modifiée de Bokito.

**Figure 2.6.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous-population des forestiers a) et fruitiers b) de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

**Figure 2.7.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous-population de palmiers a) et bananiers b) de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

**Figure 2.8.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous-population des agrumes de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

**Article- Fig. 1:** Citrus production basins in three contrasting humid agro ecological zones of Cameroon.

**Article- Fig. 2:** Classification of citrus production basins of Cameroon by clustering *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity in 2005 and 2006.

**Article- Fig. 3:** Altitudinal differences in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity on citrus leaves and fruits in 2005 (1) and 2006 (2) in the humid zones of Cameroon.

**Article- Fig. 4:** Heterogeneity in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity on leaves and fruits of citrus species in 2005 (1) and 2006 (2) in the humid zones of Cameroon.

**Article- Fig. 5:** Heterogeneity in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity of citrus amongst soil types in the humid zone of Cameroon.

**Article- Fig. 6:** Differences in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity of citrus amongst the major vegetations in the humid zone of Cameroon.

**Article- Fig. 7:** Risk factors associated with the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease in the humid zone of Cameroon. (A) Altitude, citrus species, citrus variety and tree type as main factors responsible for disease severity on leaves. (B) Altitude, citrus species, rainfall, mean temperature and citrus variety as the main factors responsible for disease severity on fruits.

**Figure 4.1.** Carte de localisation des sites d'essai dans les zones agro-écologiques du Cameroun.

**Figure 4.2.** Oranger portant une plaque d'observation dans la parcelle de Bokito.

**Figure 4.3.** Température, humidité relative et pluviométrie moyennes des 20 dernières années dans les sites d'étude.

**Figure 4.4.** Teneur en argile, sable et limons des sols dans les sites d'étude au niveau des deux horizons H0-20 et H 40-60.

**Figure 4.5.** pH des sols dans les sites d'étude au niveau des deux horizons H0-20 et H 40-60.

**Figure 4.6.** Teneur en matières organiques des sols des différents sites d'études dans les horizons 0-20 et 40-60.

**Figure 4.7.** Teneur en phosphore et bases échangeables des sols des différents sites d'étude dans leurs horizons 0-20 et 40-60.



**Figure 4.8.** Capacité d'échange cationique et taux de saturation des sols des différents sites d'étude dans leurs horizons 0-20 et 40-60.

**Figure 4.9.** Comparaison des 4 dates d'observation par rapport aux variables de la maladie (Nles, Nlesm et Pom).

**Figure 5.1.** Plan de la parcelle d'essai d'ombrage à Foubot.

**Figure 5.2.** Exemples de semi-variogramme (Baillargeon, 2005).

**Figure 5.3.** Représentation graphique du nombre moyen de lésions par feuille pour chaque plant de pomélo (Nles) et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.4.** Représentation graphique du nombre moyen de lésions par feuille malade pour chaque plant de pomélo (Nlem) et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.5.** Représentation graphique du pourcentage de feuilles malades pour chaque plant de pomélo et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.6.** Représentation graphique des résidus du nombre moyen de lésions par feuille pour chaque plant de pomélo pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.7.** Représentation graphique des résidus du nombre moyen de lésions par feuille malade pour chaque plant de pomélo pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.8.** Représentation graphique des résidus du pourcentage de feuilles malades pour chaque plant de pomélo pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.9.** Semivariances observées (carrés) et modèle correspondants (courbes) pour les résidus du nombre moyen de lésions par feuille par plant à la date1(a), date2 (b) ; du nombre moyen de lésions par feuille par feuille malade à la date1 (c) et la date 2 (d) et du pourcentage de feuilles malades à la date 1 (e) et la date 2 (f) sur plants de pomélo dans la parcelle de Foubot.

**Figure 5.10.** Cartes de Krigeage pour la distribution spatiale des résidus du nombre moyen de lésions par feuille par plant à la date1(a), date2 (b) ; du nombre moyen de lésions par feuille par feuille malade à la date1 (c) et la date 2 (d) et du pourcentage de feuilles malades à la date 1 (e) et la date 2 (f) sur plants de pomélo dans la parcelle de Foubot.

**Figure 6.1.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes t1 et t2 sur orangers.

**Figure 6.2.** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur orangers (intervalle de confiance 95%).

**Figure 6.3.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur orangers (intervalle de confiance à 95%).

**Figure 6.4.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes t1 et t2 sur pomélos.

**Figure 6.5.** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur orangers (intervalle de confiance 95%).

**Figure 6.6.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur pomélos (intervalle de confiance à 95%).

**Figure 6.7.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes t1 et t2 sur satsumas.

**Figure 6.8.** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur mandariniers Satsuma (intervalle de confiance 95%).

**Figure 6.9.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur satsumas (intervalle de confiance à 95%).6.4

## ***Introduction***



## Introduction

Les agrumes, encore appelés Hespérides dans la mythologie grecque (Bailey *et al*, 2006), sont originaires du sud-est asiatique, dans les régions allant du Nord-Est de l'Inde au nord de la Birmanie et celle du Sud de l'île de Hainan (Ollitrault *et al*, 1997). Ce sont des arbres de la famille des Rutacées composée de 156 ou de 16 espèces selon que les auteurs ont ou non pris en compte les hybrides (Tanaka, 1961 ; Swingle, 1967). En effet, il existe entre les agrumes de larges possibilités d'hybridations interspécifiques ainsi que de la polyembryonie qui fixe ces structures hybrides (Takami *et al*, 2005). Tanaka a ainsi classé comme espèce de nombreux hybrides intra ou interspécifiques. Les agrumes, qui font l'objet de cette étude, comprennent essentiellement les espèces à usage commercial du genre *Citrus* : *Citrus sinensis* (L.) Osb., (oranger) ; *Citrus reticulata* Blanco, (mandarinier) ; *Citrus paradisi* Macf., (pomélo) ; *Citrus maxima* (Burm.) Merr., (pamplemoussier) ; *Citrus limon* (L.) Burm. F., (citronnier) ; *Citrus aurantifolia* (Christm.) Swing., (limettier) ; *Citrus aurantium* L., (bigaradier) et *Citrus medica* L., (cédratier). Ces espèces sont cultivées pour leurs fruits qui sont consommés frais ou transformés, et pour leurs huiles essentielles.

Les agrumes sont économiquement importants. En valeur monétaire, ils représentent le groupe de fruits le plus important du commerce international. La production annuelle a dépassé 105 millions de tonnes dans la période 2000-2004 (Anonyme, 2004). La FAO distingue 4 groupes de productions d'agrumes. Il s'agit du groupe des oranges, du groupe des pamplemousses et pomélos, du groupe des limes et citrons et de celui des petits agrumes. Dans cette dernière catégorie, la Chine avec 4 694 471 tonnes, est en 2009 le premier pays producteur dans le monde. Elle est suivie du Nigéria (3 769 420 tonnes), de la Colombie (732 218 tonnes) et de la Guinée Conakry (244 002 tonnes) (FAOSTAT, 2011). L'agrumiculture occupe donc une place importante en Afrique en général et en Afrique tropicale en particulier.

Les agrumes sont originaires des régions tropicales et subtropicales d'Asie du Sud-Est où les températures les plus fraîches descendent rarement en dessous de 15°C. Toutefois, ils ont été introduits dans des régions plus froides (en Méditerranée par exemple) et sont désormais cultivés de part et d'autre de l'équateur sur une aire géographique très large (de 40° nord à 40° sud). Les agrumes présentent donc une grande capacité d'adaptation à des conditions pédoclimatiques très différentes.

En Afrique tropicale humide, et au Cameroun en particulier, les agrumes sont produits généralement dans des systèmes où ils jouent un rôle important à plus d'un titre. Ils constituent des sources de revenus pour les ménages et des apports nutritionnels de qualité notamment pour leur richesse en éléments minéraux, en vitamines et en fibres (Economos & Clay, 1998). De par leur nature pérenne, ils sont aussi un des éléments de restauration des équilibres écologiques après la déforestation (Westphal *et al*, 1985). Ils constituent surtout une des principales composantes de diversification des productions (Kuate *et al*, 2006a).

Les principaux agrumes produits au Cameroun sont les oranges, les mandarines, les citrons, les limes, les pomélos et les pamplemousses. Les productions se font dans des niches écologiques bien circonscrites par des barrières parfois physiques ou administratives (Ndo, 2007). Ces bassins de production sont différents en termes de population d'espèces ou de variétés d'agrumes cultivés, de caractéristiques climatiques, de caractéristiques physiques (végétation, sol, altitude), de système de culture et de niveau épidémiologique vis-à-vis des maladies et des ravageurs. Les systèmes les plus courants où se cultivent les agrumes au

Cameroun sont les systèmes agroforestiers complexes et diversifiés à base de cacao ou de café (Kuate *et al*, 2006a ; Laird *et al*, 2007 ; Sonwa *et al*, 2007). L'essentiel de la production est fournie par de petits producteurs et les quantités produites sont mal connues. Dans une étude de marché des fruits et légumes au Cameroun, Temple (1999, 2001) les a estimées à près de 22 792 tonnes tandis que la FAO les estimait à moins de 85 tonnes par an (FAOSTAT, 2011). Ces chiffres montrent que la production n'est pas connue avec précision, mais qu'elle est toutefois faible et loin de satisfaire la demande nationale d'agrumes. Cette demande peut être estimée à au moins 150 000 tonnes par an pour les 15 000 000 d'habitants que compte le pays, estimation faite sur la base de la consommation moyenne en oranges fraîches par habitant et par an des pays de la Communauté Européenne estimée à environ 10 Kg (Spreen, 2001). Les marges d'accroissement sont donc énormes. Les conditions écologiques favorables au développement des agrumes (Anonyme, 2006a ; Loussert, 1989) sont pourtant présentes dans plusieurs régions du Cameroun où de nombreux arbres sont observés dans les bassins de production dispersés sur l'ensemble du territoire.

La faible production des agrumes au Cameroun peut être expliquée par l'absence de maîtrise des itinéraires techniques par les producteurs (du choix du matériel végétal à la récolte), la faible accessibilité aux intrants agricoles et surtout la présence des bioagresseurs (Dury, 1999 ; Kuate *et al*, 2006a). Les agrumes doivent en effet faire face aux pressions parasitaires en constante évolution qui constituent une des principales contraintes de production en Afrique tropicale (Mariau, 1999). Les agrumes sont attaqués par des insectes qui se nourrissent aux dépens de la plante, entraînant des déformations au niveau des feuilles et des fruits. Ces insectes peuvent également être des vecteurs de maladies bactériennes (greening) ou virales (tristeza). Les principaux insectes ravageurs des agrumes sont les mouches des fruits (*Diptera* et *Tephritidae*), les pucerons (*Aphis gossypii* et *Toxoptera citricida*), les cochenilles (*Aonidiella spp.*, *Unaspis spp.*) et les psylles (*Diaphorina citri*, *Tryoza erytreae*) (Aubert, 1992 ; Mariau, 1999 ; Tamesse *et al*, 2002). Le scab (*Elsinoe spp.*) et la gommose (*Phytophthora spp.*) sont des affections dues aux champignons sur agrumes et dont les dégâts peuvent être considérés comme importants. Cependant, parmi toutes les maladies recensées sur agrumes en Afrique tropicale, la phaeoramulariose est la plus dévastatrice (Yesuf, 2002). Egalement appelée cercosporiose des agrumes (en anglais : Phaeoramulia leaf and fruit spot disease ou angular leaf spot of citrus), elle est causée par *Pseudocercospora angolensis* (T. Carvalho & O. Mendes) Crous & U. Braun 2003. C'est un champignon de la famille des mycosphaerellacées (Pretorius *et al*, 2003). Cette maladie a été signalée pour la première fois en Angola et au Mozambique en 1952 par De Carvalho et Mendes. L'agent pathogène responsable a tour à tour été nommé *Cercospora angolensis* en 1953 par De Carvalho et Mendes, *Phaeoramularia angolensis* en 1983 par Kirk, et *Pseudocercospora angolensis* depuis 2003 par Crous et Braun (Chalkley, 2011). Depuis 1952, la maladie a connu une expansion rapide dans 21 pays en Afrique au sud du Sahara et au Yémen, constituant une sérieuse menace pour les productions agrumicoles de ces pays. En 2006, sa présence a été confirmée en Sierra Léone (Harling *et al*, 2010), preuve de la progression de la maladie vers des zones où elle était absente il y a quelques années (Anonyme, 2006).

Au Cameroun, la phaeoramulariose a été signalée depuis 1969 (Menyonga, 1971). Ses dégâts sur les variétés sensibles et dans les zones qui lui sont favorables peuvent entraîner 100% de perte des récoltes à travers la chute précoce des feuilles et fruits attaqués, la déformation et la malformation des fruits (Brun 1972 ; Kuate *et al*, 1994b et c). Son incidence varie de façon croissante avec une élévation en altitude (>200 m). Elle est également plus marquée sur des sites avec des conditions climatiques plus fraîches et plus humides (Kuate, 1998). La description des symptômes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche menés au



Cameroun (Kuate *et al*, 1994 b et c). Il en est de même pour l'évolution des courbes épidémiologiques. Le criblage en champ du matériel végétal introduit a permis de classer les agrumes en 3 catégories, allant des très sensibles (pomélos et certains mandariniers), aux peu sensibles (citronniers et limes) en passant par les sensibles (orangers et autres mandariniers) (Seif et Hillocks, 1998 ; Bella-Manga *et al*, 1999). L'évaluation de l'efficacité des fongicides dans des dispositifs de recherche en station a été effectuée au Cameroun, en Ethiopie, au Kenya et en Guinée Conakry (Seif et Hillocks, 1999 ; Kuate, 2003 ; Diallo *et al*, 2003 ; Yesuf, 2007). Dans l'ensemble, les conditions favorables au développement de l'épidémie sont assez bien connues ; il en est de même des périodes et des zones géographiques favorables. Cependant, la plupart de ces études ont été effectuées dans des vergers expérimentaux en milieu contrôlé.

L'expression de la maladie sur les agrumes au sein des systèmes agroforestiers est relativement mal connue. La maîtrise des interactions entre le milieu, l'espèce ou la variété hôte et l'agent pathogène présente encore des lacunes. Ces connaissances sont pourtant indispensables à l'élaboration de modèles de prévision de la maladie en vue du développement d'une stratégie de lutte intégrée. Ainsi, il apparaît que les effets de certaines pratiques culturales telles que l'ombrage, la fumure ne sont pas connus. Il en est de même du comportement des espèces dans différents milieux. Aussi peut-il arriver que dans des plantations situées dans les mêmes sites, l'ampleur des dégâts causés par la maladie puisse être très variable. Ceci pourrait s'expliquer par la diversité des itinéraires techniques (variétés, associations, densités, micro-environnement, types de traitements, types de plants, âge) (Ndo, 2007). Ces facteurs, beaucoup plus fins, pourraient donc entrer en jeu dans le développement de la maladie au niveau des exploitations et au niveau de chaque arbre.

Dans ce contexte, il est à craindre que les recommandations de lutte chimique stéréotypées (traditionnelles) soient inadaptées et ceci, d'autant plus que les produits phytosanitaires recommandés ne sont pas souvent à la portée des petits producteurs d'agrumes. De plus, il y a une recommandation croissante de la communauté internationale et de la plupart des acteurs des filières alimentaires pour réduire les quantités de pesticides utilisées et répondre ainsi aux normes des produits écologiquement propres et moins polluants (Anonyme, 2005).

L'expression d'une maladie peut être influencée par de nombreux facteurs dont les interactions peuvent se résumer dans le tétraèdre de la maladie (Zadocks, 2001). Ces facteurs peuvent être notamment les conditions environnementales dans l'exploitation, la biologie de l'agent pathogène, son mode de dispersion et la nature génétique de l'hôte, les interventions du producteur... En se référant à d'autres modèles épidémiologiques dans lesquels ces interactions sont mises en évidence (Mila *et al*, 2003 ; Agostini *et al*, 2003 ; Avelino *et al*, 2004 ; Thébaud *et al*, 2006), nous partons donc de l'hypothèse que certaines caractéristiques climatiques, physiques (type de sol, altitude), agronomiques (système de cultures, pratiques culturales), biotiques (variétés des populations d'hôtes, présence de l'inoculum) influent de façon déterminante sur la présence et le niveau de l'épidémie dans un bassin de production donné. La connaissance de ces caractéristiques permettrait d'amorcer la recherche d'une stratégie de lutte adaptée à chaque contexte agroécologique, respectueuse de l'environnement et applicable par les petits producteurs des zones tropicales humides. Ceci passe par une meilleure connaissance du pathosystème *Phaeoramularia angolensis*-*Citrus* sp.

Ce travail a pour objectif de déterminer les principaux facteurs (climat, matériel végétal, fertilité du sol, ombrage, répartition spatiale des arbres...) ayant une influence dans l'épidémie de la phaeoramulariose des agrumes et d'évaluer cette influence sur l'intensité de

la maladie. Ce travail d'évaluation devrait permettre de proposer des stratégies de gestion permettant de limiter les risques épidémiologiques dans les bassins de production d'agrumes des zones humides du Cameroun voire de les prévenir dans ceux où la maladie est jusqu'à présent absente.

Il s'agit plus spécifiquement :

1. d'identifier les facteurs biotiques et abiotiques qui déterminent le niveau épidémiologique ;
2. d'évaluer l'impact des principaux facteurs sur la sévérité de la maladie (climat, altitude, matériel végétal, paramètres du sol, ombrage, répartition spatiale des arbres) ;
3. de définir un modèle qui permettra d'évaluer le risque épidémiologique dans des sites de production des agrumes.
4. d'élaborer des recommandations pour une meilleure gestion du pathosystème *Pseudocercospora angolensis* - *Citrus* sp. dans les zones agroécologiques.

L'étude est menée dans un environnement diversifié avec un grand nombre de facteurs pris en considération. Pour mener à bien ce travail, deux types de démarches sont utilisés : (a) une enquête descriptive dans les différents bassins de production d'agrumes : elle a pour but d'appréhender cette diversité et de déterminer les principaux facteurs responsables du développement de la Phaeoramulariose ; (b) des expérimentations plus fines permettant ensuite d'évaluer le poids dans l'épidémiologie des principaux facteurs retenus par l'enquête. Au terme de cette étude, des recommandations dans la gestion du pathosystème *Citrus-Pseudocercospora angolensis* sont élaborées.

Sept chapitres composent l'ensemble de ce travail :

- Le premier chapitre est une revue de la littérature sur les agrumes, la maladie et l'agent pathogène, et sur l'effet de différents facteurs dans l'épidémiologie
- Le deuxième chapitre est une illustration de la composition et de la structure des peuplements à base d'agrumes. Cette illustration se fait à l'aide de deux parcelles d'agrumes appartenant à deux systèmes de productions différents
- Le troisième chapitre se résume à l'identification des principaux facteurs qui influencent la sévérité de la phaeoramulariose. Il présente les résultats d'une enquête et fait l'objet d'un article intitulé "**Altitude, tree species and soil type as the main factors influencing the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon**", publié dans European Journal of Plant Pathology
- Le quatrième chapitre traite du comportement de différentes variétés de citrus en fonction du climat, de l'altitude et du type de sol vis-à-vis de la phaeoramulariose
- Les analyses de l'impact de l'ombrage et de la distribution spatiale de la maladie dans une parcelle monospécifique font l'objet du chapitre cinq
- Dans le sixième chapitre, il s'agira d'élaborer un modèle de prédiction pour la gestion du risque de développement de la phaeoramulariose

- Le septième chapitre fait la synthèse des résultats et présente les recommandations, la conclusion et les perspectives de notre travail.



## ***Chapitre 1 :***

### ***L'hôte, l'agent pathogène, la maladie***



## **Chapitre 1 : L'hôte, l'agent pathogène, la maladie**

La phaeoramulariose attaque les feuilles et les fruits des agrumes. Pour étudier cette maladie, il est important d'avoir de meilleures connaissances sur la plante hôte, l'agent pathogène responsable, les manifestations de la maladie et les moyens de lutte. Ce chapitre fait donc un état des connaissances acquises sur ce sujet.

### **1.1 Les agrumes**

#### **1.1.1 Origine et distribution géographique**

Les agrumes sont originaires du Sud-Est asiatique (De Rocca Serra & Ollitrault, 1992). Cependant, les données historiques plaident en faveur de l'existence de trois centres de diversification primaire (Webber, 1967 ; Scora, 1988) :

- Le Nord-Est de l'Inde, les régions proches de la Birmanie et de la Chine, auraient abrité la diversification de *C. medica* et l'apparition de *C. aurantifolia*, *C. limon*, *C. aurantium* et *C. sinensis* ;
- La Malaisie et l'Indonésie sont citées comme centre d'origine de *C. grandis*.
- le Vietnam, le Sud de la Chine et le Japon seraient la zone de diversification de *C. reticulata* (Anonyme, 1998).

La diffusion des agrumes à travers le Monde s'est faite très lentement. Le cédratier a été la première espèce connue en Europe (300 ans av. J.-C. d'après Webber, 1967). Le bigaradier, le citronnier et l'oranger ont été introduits dans le bassin méditerranéen vers la moitié du XII<sup>e</sup> siècle, et le mandarinier au XIX<sup>e</sup> siècle. Le bassin méditerranéen constitue à présent une importante zone de production pour ces trois dernières espèces. L'introduction des agrumes en Afrique de l'Est a été faite par les commerçants arabes et hindous vers le XIV<sup>e</sup> siècle. La diffusion vers le bassin du Congo a été assurée par la suite par les explorateurs portugais (Spiegel-Roy & Goldschmidt, 1996).

#### **1.1.2 Taxonomie**

Les agrumes appartiennent à trois genres botaniques : *Citrus*, *Fortunella* et *Poncirus* (De Rocca Serra & Ollitrault, 1992 ; Spiegel-Roy & Goldschmidt, 1996; Anonyme 1998). Ceux-ci forment avec 10 autres genres (*Atalantia*, *Burkillanthus*, *Citropsis*, *Clymenia*, *Eremocitrus*, *Hespertusa*, *Limnocitrus*, *Microcitrus*, *Pleiospermium* et *Severinia*) la sous-tribu des *Citrinae* (Anonyme 2001a). Cette sous-tribu appartient à la tribu des *Citreae*, sous-famille des *Aurantioideae* dans la famille des Rutacées.

Le genre *Citrus* renferme la plupart des agrumes cultivés pour leurs fruits ou leurs huiles essentielles. Deux classifications du genre prévalent. Celle de Tanaka (1961) identifie 156 espèces, tandis que celle de Swingle et Reece (1967) n'en distingue que 16 espèces. En référence à cette dernière classification, les huit espèces cultivées sont : *C. sinensis* (L.) Osb., l'oranger ; *C. aurantium* L., le bigaradier ; *C. reticulata* Blanco, le mandarinier ; *C. paradisi* Macf., le pomelo ; *C. maxima* (Burn.) Merr., le pamplemoussier ; *C. limon* (L.) Burm., le

citronnier ; *C. aurantifolia* (Christm.) Swing., le limettier et *C. medica* L., le cédratier. Ces espèces renferment un grand nombre de variétés.

Certaines études répartissent ces 8 espèces d'importance économique dans 3 grands groupes en fonction des similarités génétiques. Il s'agit du groupe des orangers et mandariniers, du groupe des pomélos et pamplemoussiers et du groupe des limes et citronniers (Luro *et al*, 2001). D'autres travaux plus récents sur la diversité génétique et la structure des populations des agrumes penchent plutôt en faveur de l'existence de 3 espèces « ancestrales » d'agrumes. Il s'agit du bigaradier (*C. medica*), du pamplemoussier (*C. maxima*) et du mandarinier (*C. reticulata*). Ces espèces seraient à l'origine de nombreuses espèces comptabilisées de nos jours, qui en réalité sont des hybrides issus de croisement entre les premières espèces (Barkley *et al*, 2006).

### **1.1.3 Ecologie et phénologie des agrumes**

#### **1.1.3.1 Ecologie**

Les agrumes présentent une grande capacité d'adaptation à des conditions pédoclimatiques très différentes. La culture des agrumes est possible partout où la température moyenne de l'année est supérieure à 13°C et inférieure à 39°C. Les agrumes préfèrent les climats maritimes des zones subtropicales. En terme de besoins en eau, 120 mm par mois, soit 1200 à 1500 mm par an, représentent une quantité d'eau au-dessous de laquelle la culture des agrumes nécessite une irrigation (Anonyme, 2006).

La lumière a une action très remarquée sur la qualité et la coloration des fruits. Les arbres fruitiers sont plus exigeants sur les caractéristiques physiques du sol et non sur les caractéristiques chimiques qui peuvent être corrigées par des apports d'engrais et d'amendements. Les sols doivent être profonds et de préférence légers (sablo-argileux ou argilo-sableux), bien drainés. Les agrumes redoutent les eaux salines (au-dessus de 0,5%). Le pH idéal est situé entre 5,5 et 7,5 (Walali Loudyi *et al*, 2003 ; Van Ee, 2005). C'est à cet effet que le choix du porte-greffe est un des facteurs essentiels de réussite car il peut conférer à la plante une tolérance à des maladies et à des contraintes abiotiques (salinité, pH, froid, sécheresse, calcaire...). L'optimum d'altitude pour un bon développement des agrumes se situe entre 1000 et 1300 m car ces derniers ne doivent pas être trop exposés aux vents. Loussert (1989) signale qu'au-dessous de 800 m, les fruits manquent de saveur. La peau des oranges reste verte, les cloisons deviennent plus épaisses.

#### **1.1.3.2 Phénologie**

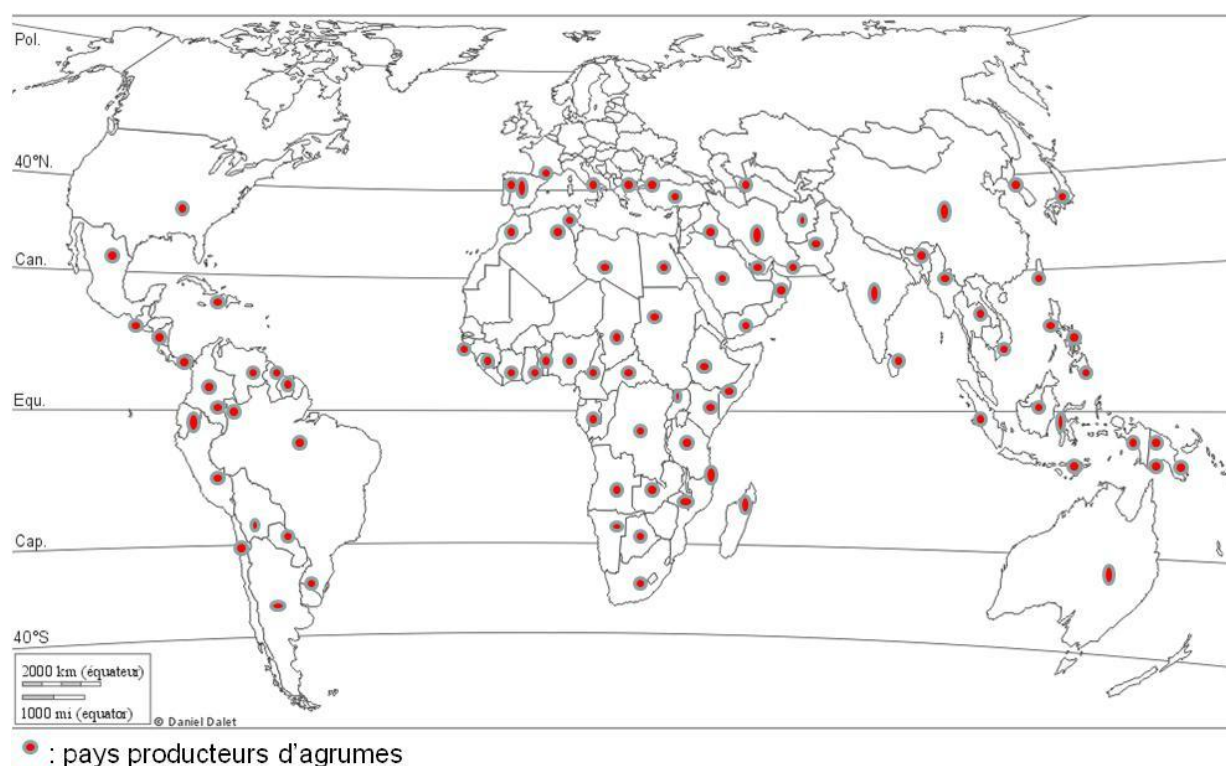
Le développement de la frondaison des agrumes se fait sous forme de flux végétatif ou poussée foliaire (flush). Ces flux végétatifs succèdent à des périodes d'arrêt végétatif. Ce phénomène s'observe même en climat tropical humide où les conditions permettent une activité végétative continue (Praloran, 1971). Il existe généralement 3 flux végétatifs par an. Ils commencent avec le début des pluies. Le premier flux, qui est de loin le plus important (longueur et nombre de rameaux émis), débute en mars avec le retour des pluies. Le second se fait au mois d'août, il est également déclenché par le retour des pluies. Le dernier survient en octobre.



La floraison se produit en même temps que la pousse qui suit le repos végétatif. Les fleurs sont isolées ou en grappes et se forment sur le bois de l'année précédente (Praloran 1971 ; Menino *et al*, 2003). La floraison est continue tout au long de l'année sur les citronniers et limettiers. Sur les autres espèces on peut avoir une ou 2 périodes de floraisons par an. Sur un même arbre, on peut ainsi retrouver des feuilles, des fleurs et des fruits de différents âges (Van Ee, 2005). Dans la zone forestière humide du Cameroun, deux principales périodes de floraison sont observées. La première a lieu entre mars et juin et la seconde de septembre à décembre (Kuate et al, 1992).

#### 1.1.4 Production des agrumes dans le monde

Les productions d'agrumes proviennent essentiellement des régions méditerranéennes et tropicales. En 1988, la superficie totale plantée en agrumes a été évaluée à plus de 3 millions d'hectares répartie sur une aire très large située approximativement entre les 40° de latitudes Nord et Sud tout autour du Monde (Anonyme, 2004 ; Polese, 2008). Les agrumes sont donc de nos jours implantés dans toutes les zones du monde où leur production est possible. Les pays producteurs forment une ceinture terrestre entre le 40<sup>ème</sup> parallèle nord et sud (Figure 1.1).

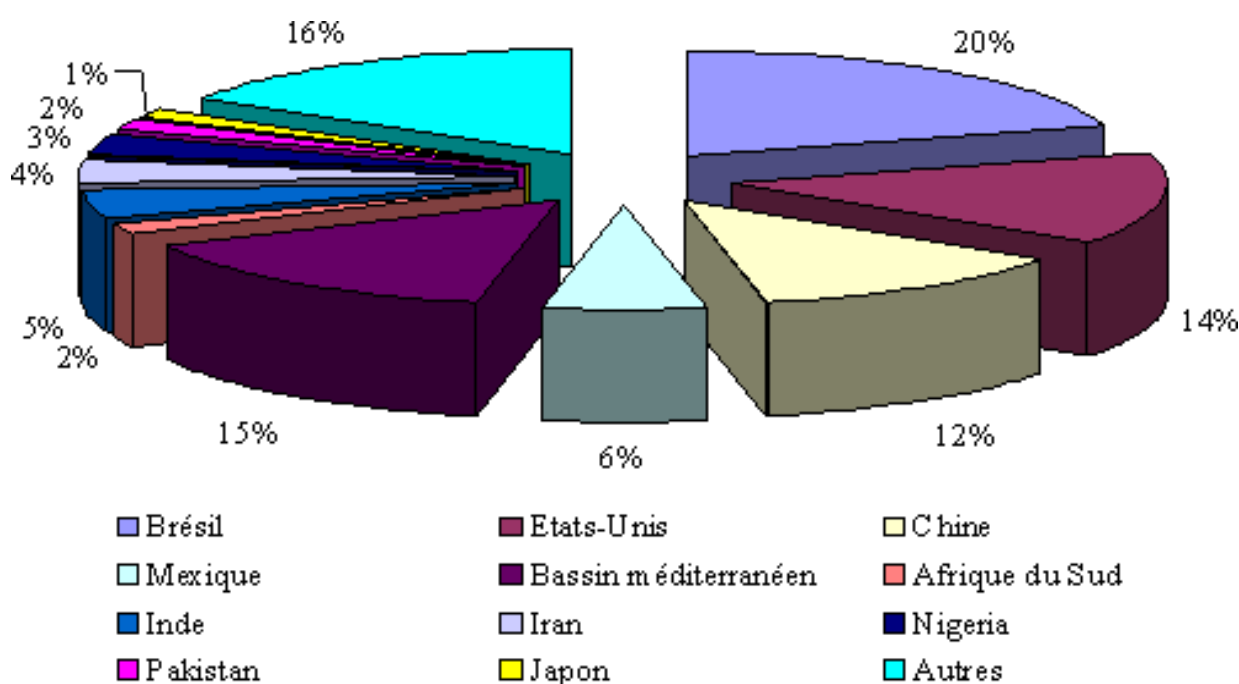


**Figure 1.1.** Principaux pays producteurs d'agrumes dans le monde.

Initialement les Etats-Unis et la zone méditerranéenne produisaient les plus grandes quantités. La production s'est ensuite développée au Brésil et en Asie (Griffon & Loeillet, 2000). Actuellement, l'agrumiculture occupe une place importante en Afrique en général et en Afrique tropicale en particulier. Huit pays africains (Nigéria, Guinée Conakry, Tunisie, Sierra

Léone, Kenya, Angola, Tanzanie, Côte d'Ivoire) figurent dans la liste des 20 plus grands producteurs mondiaux des petits agrumes.

La production annuelle mondiale a dépassé 105 millions de tonnes dans la période 2000-2004 (Anonyme, 2004). Les agrumes sont commercialisés soit en fruits frais, soit transformés (jus de fruits, liqueurs, confitures etc...). La figure 1.2 présente la répartition géographique de la production d'agrumes destinés au marché de fruits frais dans la période 2000-2004. Les huiles essentielles d'agrumes représentent également un des produits commercialisés à haute valeur ajoutée. Elles sont extraites de fleurs, d'écorces, de feuilles et de fruits.



**Figure 1.2.** Répartition géographique de la production d'agrumes destinés au marché de fruits frais pendant la période 2000-2004 (Source : Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement à partir des données de la FAO).

Actuellement, la production mondiale d'agrumes est de l'ordre de 122 millions de tonnes. C'est la deuxième production fruitière derrière le groupe des bananes et plantains (125 millions de tonnes) loin devant la pomme (70 millions de tonnes) (Loeillet 2010). Les productions d'agrumes sont réparties en 4 groupes par la FAO. Il s'agit du groupe des oranges, de celui des pamplemousses et pomélos, du groupe des citrons et limes et de celui des petits agrumes qui regroupe les autres espèces commercialisées. Les oranges constituent la majeure partie de la production des agrumes (58%) suivi des citrons avec plus de 10%. Le reste de la production est partagé entre les pamplemousses, les pomélos et les autres petits agrumes (mandarines, tangelos, tangors). Dans le groupe des oranges, les cinq plus grands producteurs mondiaux en 2009 sont le Brésil (1 7 618 500 tonnes), les Etats-Unis (8 280 780

tonnes), l'Inde (5 201 350 tonnes), la Chine (4 864 959 tonnes) et le Mexique (4 193 480 tonnes). Dans celui des pamplemousses et pomélos, les cinq premiers producteurs sont la Chine (2 768 308 tonnes), les Etats-Unis (1 182 970 tonnes), le Mexique (395 000 tonnes), l'Afrique du sud (370 411 tonnes) et Israël (249 414 tonnes). Dans le groupe des limes et citrons, l'Inde (2 571 530 tonnes), le Mexique (1 987 450 tonnes), la Chine (1 014 446 tonnes), l'Argentine (1 000 000 tonnes) et le Brésil (972 437 tonnes) sont les cinq premiers pays producteurs. Dans le groupe des petits agrumes, la Chine est le premier pays producteur avec 4 694 471 tonnes. Elle est suivie du Nigéria (3 769 420 tonnes), de la Colombie (732 218 tonnes) et de la Guinée Conakry (244 002 tonnes) (FAOSTAT, 2011). Dans la majorité des pays d'Afrique tropicale, les agrumes sont plantés soit par des petits producteurs, soit par des entreprises privées ou gouvernementales pour la consommation locale ou l'exportation (Yesuf, 2002).

### **1.1.5 Production des agrumes au Cameroun**

#### **1.1.5.1 Importance des agrumes**

La production d'agrumes au Cameroun est mal connue et il est difficile de connaître les quantités exactes produites. Les principaux groupes d'agrumes produits sont les oranges, les citrons, les mandarines, les pomélos et les pamplemousses. Les quantités produites ont été estimées dans une étude de marché en 2001 à 22 792 tonnes (Temple, 2001). Toutefois les estimations de la FAO sont inférieures à 85 tonnes chaque année (FAOSTAT, 2011). Ces chiffres ne reflètent pas l'importance des agrumes dans les revenus et l'alimentation des populations camerounaises. Les agrumes sont cultivés en majorité par les petits paysans au Cameroun. Ils représentent l'une des principales sources de diversification de leurs revenus après la chute des prix du cacao et du café sur les marchés internationaux. A cet effet, on note de plus en plus un engouement des producteurs à planter des agrumes pour garantir l'étalement de leurs revenus tout au long de l'année (Kuate *et al*, 2006a). Les fruits constituent la majorité des apports en vitamines, en éléments minéraux et en fibres pour les populations (Economos & Clay, 1998). Les arbres quant à eux constituent un élément de restauration des équilibres écologiques après la déforestation (Westphal *et al*, 1985) et une des composantes de diversification des productions.

#### **1.1.5.2 Bassins de production**

Au Cameroun, les agrumes peuvent se cultiver sur l'ensemble du pays. Les productions d'agrumes se font dans des niches écologiques bien circonscrites appelées « bassins de production ». Ces bassins sont dispersés à l'intérieur du pays. Leur localisation n'est pas faite avec précision dans la littérature. Toutefois, une étude de quantification des productions et des échanges des fruits et légumes au Cameroun réalisée par Temple (1999, 2001) donne certaines indications à partir des circuits de commercialisation. Ainsi, il identifie les bassins de production des oranges dans la province du Centre, département du Mbam. Dans la province du Littoral, département du Mounjo (Njombé, Mbanga) et département du Nkam (Yabassi), au Sud-Ouest dans le département de la Mémé (Tombel) et le département de la Manyu (Mamfé). Au Nord-Ouest le bassin de production se localise dans le département du Bui (Jakiri). A l'Ouest, le département du Noun (Malentouen). Dans le grand nord, des petits

bassins de production se localisent à Doumro, Ngaoundéré et Mbé. La production de l'Est est localisée principalement à Batouri.

En ce qui concerne les citrons, la production se concentre dans le triangle « Obala-Okola-Sa'a » dans la province du Centre, les villages Akom et Mvie dans la province du Sud. La production du Littoral se localise dans les départements du Moungo, de la Sanaga Maritime (Pouma) et du Nkam (Yabassi). Au Sud-Ouest, la production est principalement localisée à Edinki, Barombi, Kumba et Bombé. Le grand nord est la principale zone de production au Cameroun.

Les zones de production des mandarines dans la province du Centre sont localisées dans les départements de la Lékié (Obala, Sa'a) et du Mbam (Mbangassina, Ombessa). Dans la province du littoral, la production se localise dans les départements du Moungo (Nlohé, Njombé, Mbanga, Dibombari) et de la Sanaga Maritime (Pouma).

La principale zone de production de pomélos et pamplemousses est la province du Littoral, en particulier le département du Moungo (Njombé, Mbanga, Loum), et celui du Nkam (Yabassi). Dans la province du centre, ces fruits sont produits dans de nombreux villages situés entre le département de la Lékié et celui du Mbam.

Une caractérisation des principaux bassins de production d'agrumes dans les zones humides du Cameroun (Ndo, 2007) a montré qu'au moins 4 des 5 principaux groupes d'agrumes étaient présents dans chacun des bassins. Les orangers étaient l'espèce la plus abondante dans la majorité des bassins de production.

### **1.1.5.3      Systèmes de production**

Les agrumes se retrouvent dans plusieurs systèmes de production au Cameroun. Ils sont plantés autour des maisons dans des jardins de cases (Figure 1.3a). Dans ce cas, en dehors des fruits qu'ils produisent, ils servent d'arbres d'ombrage, de plantes ornementales ou pour la délimitation des terrains. On retrouve également les agrumes dans des vergers de taille plus ou moins grande (Figure 1.3b), disséminés dans l'ensemble des bassins de production (Ndo, 2007). Toutefois, le système de culture des agrumes le plus important au Cameroun est celui dans lequel ils sont en association dans des parcelles agroforestières à base de cacaoyers et caféiers (Aulong *et al*, 2000 ; Laird *et al*, 2007 ; Ndo, 2007 ; Sonwa *et al*, 2007). Dans ces systèmes, les cacaoyers ou caféiers sont les cultures principales. Ils sont associés aux arbres forestiers et aux fruitiers. Parmi les fruitiers, on retrouve les manguiers, les avocatiers et diverses espèces d'agrumes. Les agrumes dans ces parcelles sont parfois les fruitiers les plus représentatifs en nombre. Dans plusieurs exploitations, outre ces cultures pérennes, des cultures vivrières annuelles ou pluriannuelles (maïs, macabo, manioc...) sont présentes (Jagoret *et al*, 2009). Ces cultures vivrières sont souvent plantées soit à la lisière des champs (Figure 1.3c), soit à l'intérieur des parcelles dans des petites clairières (Figure 1.3d).



**Figure 1.3.** Système de culture d'agrumes dans un jardin de case (a), dans un verger pur (b), dans une parcelle agroforestière associés aux caféiers et autres fruitiers avec des cultures vivrière à la lisière (c) et à l'intérieur de la parcelle (d).

## **1.2 Contraintes de la production des agrumes au Cameroun**

Les contraintes de production des agrumes, comme toutes les autres cultures fruitières au Cameroun sont de 3 ordres. L'accès aux intrants agricoles, au crédit, au marché et les problèmes fonciers sont des contraintes d'ordre socio-économiques. La maîtrise des bonnes pratiques culturales et l'accès au matériel végétal de qualité sont des contraintes agronomiques. La présence des maladies et ravageurs constitue une contrainte parasitaire (Kuaté et *al*, 2006). Cette dernière contrainte est l'une des plus importantes. Les agrumes doivent en effet faire face aux pressions parasitaires en constante évolution qui causent d'énormes pertes de production (Mariau, 1999). Les pertes économiques engendrées sont liées non seulement aux pertes de production, mais aussi à la mise en quarantaine et l'interdiction d'exporter vers d'autres zones de production afin d'éviter la dissémination d'organismes nuisibles (Anonyme, 2001b). Parmi les bioagresseurs des agrumes, on distingue les maladies et les ravageurs.

### **1.2.1 Les principaux ravageurs**

Au Cameroun, les principaux ravageurs des agrumes sont les mouches de fruits (*Diptera* et *Tephritidae*), les thrips (*Scirtothrips* spp.), les cochenilles (*Aonidiella* spp., *Unaspis* spp., ...), les pucerons (*Aphis gossypii* et *Toxoptera citricida*), les aleurodes ou mouches blanches et les psylles (*Diaphorina citri*, *Tryoza erytreae*). Ils causent divers dégâts sur les plantes. Certains se nourrissent aux dépens de la plante entraînant des déformations des feuilles et fruits (pucerons, cochenilles, psylles) ; d'autres sécrètent des substances toxiques pour la plante ou



pouvant attirer des fourmis et provoquer le développement des fumagines (Rey *et al*, 1986; Loussert, 1989). Ce sont également des vecteurs de maladies à virus comme la Tristeza (Citrus Tristeza Cloterovirus) transmis par les pucerons. Le greening véhiculé par les psylles est causé par une bactérie des espèces *Liberibacter africanum* et *L. asiaticum*. (Aubert, 1988,1992 ; Rey *et al*, 1986 ; Mariau, 1999 ; Tamesse *et al*, 2002).

### **1.2.2 Les principales maladies fongiques**

En dehors des maladies virales dont les principaux vecteurs sont les insectes mentionnés au paragraphe précédent, les agrumes font face à plusieurs maladies fongiques. La phaeoramulariose, le scab et la gommose sont les principales affections dues aux champignons sur agrumes au Cameroun. Les dégâts causés par ces maladies peuvent être considérés comme importants par leur influence sur la durée de vie des arbres ou par les pertes qu'elles entraînent sur la production (Boccas & Laville, 1978; Rey *et al*, 1986; Kuate, 1998; Agostini *et al*, 2003a ; Graham and Timmer, 2003).

Le scab affecte les jeunes feuilles, rameaux et fruits. Il peut être causé par au moins un des 3 agents pathogènes des genres *Elsinoe* et *Sphaceloma*. Les attaques de scab causent de sérieux dégâts sur l'aspect externe des fruits et rendent difficile leur commercialisation comme fruits frais (Agostini *et al*, 2003a). Les attaques sur jeunes fruits après la nouaison, entraînent leur chute. D'une manière générale, le respect des mesures phytosanitaires telles l'importation des plants certifiés, l'implantation des pépinières en milieu dépourvu d'humidité, la réduction de l'inoculum primaire par l'élagage des branches très attaquées et le suivi des différents traitements phytosanitaires peut permettre de maîtriser cette maladie (Anonyme, 1990 ; Whiteside, 1988).

Les pertes dues à la gommose commencent dès la pépinière avec la « fonte des semis » jusqu'au moment où l'arbre entre en production avec les dépérissements et la pourriture brune des fruits. Toutes les parties de la plante peuvent être attaquées, mais ce parasite se conservant dans le sol, ce sont les organes souterrains et le collet des arbres qui sont les plus exposés. C'est l'attaque se développant au niveau de ces organes qui est habituellement appelée gommose, gommose à *Phytophthora*, pourriture du pied, du collet ou de la base du tronc (Graham and Timmer 2003; de Vallavieille, 1983). Parmi la quarantaine d'espèces de champignons qui forment le genre *Phytophthora*, onze au moins sont capables d'attaquer les agrumes (Boccas et Laville 1978). Toutefois, les deux principales espèces inféodées aux agrumes sont *P. citrophthora* (Smith and Smith) Leonian et *P. nicotianae* Breda de Haan var. *parasitica* (Dastur) Waterhouse (de Vallavieille, 1983). Pour lutter contre cette maladie, on dispose de plusieurs moyens, parmi lesquels un choix judicieux des pratiques culturales, tant dans le verger qu'au niveau des pépinières (Benson & Grand, 2000), l'utilisation des traitements fongicides ou l'utilisation des variétés résistantes comme porte-greffe à l'instar du *Citrus volkameriana*, du citrange Troyer et du citrange Carrizo. (Boccas & Laville 1978).

De toutes ces maladies, la phaeoramulariose des agrumes est la plus dévastatrice sur agrumes en Afrique tropicale (Yesuf, 2002).

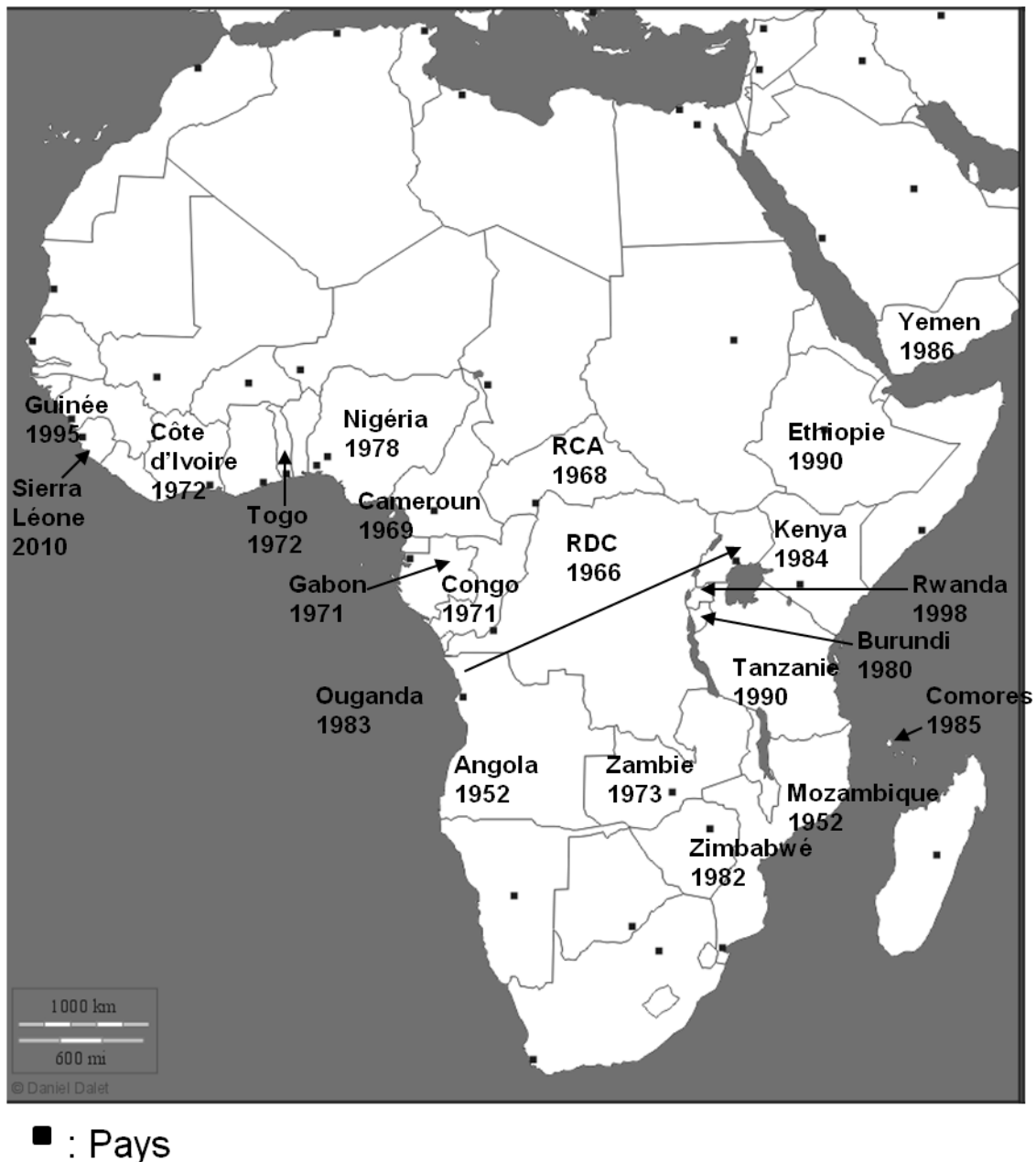
## **1.3 La phaeoramulariose des agrumes**

### **1.3.1 Origine et distribution géographique**

D'abord connue sous le nom de cercosporiose des agrumes, cette maladie a été signalée pour la première fois en Angola et au Mozambique en 1952 par De Carvalho et Mendes. L'agent responsable a alors été nommé *Cercospora angolensis*. Quelques années plus tard, la maladie a été signalée au Zaïre (actuelle RDC) en 1966, en RCA en 1968. Elle a été observée pour la première fois au Cameroun en 1969, au Congo en 1971 et au Gabon en 1973 (Menyonga, 1971 ; Brun, 1972). En 1978, elle a fait son apparition au Nigéria et a connu ainsi une expansion rapide dans 21 pays en Afrique, au sud du Sahara et au Yémen constituant ainsi une sérieuse menace pour les productions agrumicoles de ces pays (Emechebe, 1981 ; Kirk, 1986, Aubert, 1986 ; Kuate, 1998 ; Yesuf, 2002). En 2006, la présence de la phaeoramulariose a été confirmée en Sierra Leone (Harling et al, 2010), preuve de sa progression vers des zones jusque là indemnes de maladie (Anonyme, 2006). La figure 1.4 présente les différents pays où la présence de la maladie a été signalée par ordre chronologique.

### **1.3.2 Symptômes et dégâts**

La maladie attaque les fruits et les feuilles de tout âge, ainsi que les branchettes non aoûtées. Elle cause sur ces organes de nombreuses lésions, de tailles et de formes variables (Yesuf, 2002). Le développement des symptômes varie avec le stade de développement des organes attaqués. Sur les jeunes organes, les attaques sont plus sévères. Les lésions sur feuilles et fruits sont souvent circulaires et leur diamètre peut atteindre 10 cm. Elles ont généralement un centre brun ou grisâtre entouré d'un halo jaune (Figures 1.5 & 1.6). Le centre prend une teinte noirâtre lors de la sporulation qui survient généralement en saison de pluies. Sur feuilles, le centre de la lésion se perfore parfois, laissant un trou rond (Figure 1.7a). Les fruits attaqués ont une surface rigide et une faible teneur en jus. Ils sont impropres à la commercialisation et même à consommation locale (Yesuf, 2002). En dehors de la teneur en jus des fruits, la phaeoramulariose a également un effet sur la teneur en huiles essentielles des zestes (peau) des fruits. Des études ont montré une diminution du rendement en huiles essentielles allant jusqu'à 40%, en fonction de la gravité des attaques (Kuate *et al*, 2003). Les attaques sur jeunes fruits peuvent provoquer la déformation ou l'éclatement du fruit au niveau de la lésion (Figure 1.7b). La description de ces symptômes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche menés au Cameroun (Kuate *et al*, 1998). Les dégâts de la maladie sur les variétés sensibles et dans les zones qui lui sont favorables peuvent entraîner 100% des pertes de récolte (Brun 1972 ; Kuate *et al*, 1994b et c ; Seif, 1995).



**Figure 1.4.** Répartition géographique de la phaeoramulariose des agrumes et années de confirmation de la présence de la maladie pour chaque pays (Adapté de Kuate 1998, Seif 2002, EPPO, 2006 ; Harling *et al* 2010).

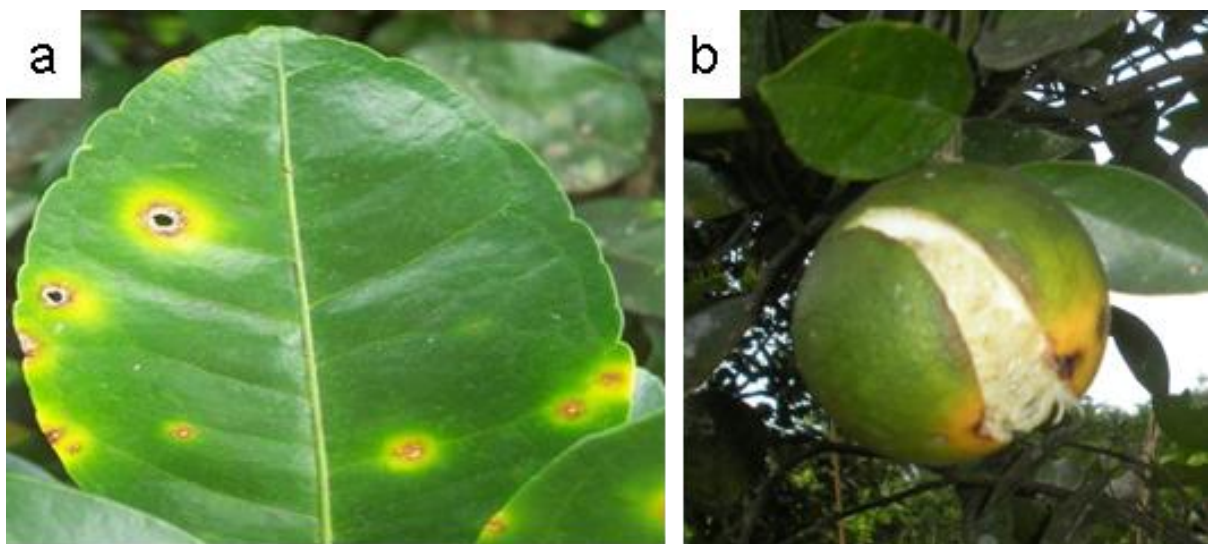




**Figure 1.5.** Lésions causées par *P. angolensis* sur fruits de pomélo (a), oranger (b) et limettier (c) dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.



**Figure 1.6.** Lésions causées par *P. angolensis* sur jeunes feuilles (a) et sur feuilles âgées de pomélo (b) dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.



**Figure 1.7.** Perforation du limbe d'un pomélo(a) et éclatement du fruit d'oranger (b) suite à une attaque par *P. angolensis* dans des vergers situés en zones humides du Cameroun.

### 1.3.3. Agent pathogène

D'abord identifié comme *Cercospora angolensis* en 1953, il a été observé plus tard que les conidies pigmentées peuvent être solitaires ou disposées en chaînettes simples ou ramifiées de 2 à 4 conidies. La formation des conidies en chaînettes a conduit à la renommation du champignon en *Phaeoramularia angolensis* (De Carvalho et Mendes) P.M. Kirk (Kirk, 1986, Yesuf, 2002). Le champignon a été nommé plus tard *Pseudophaeoramularia angolensis* à cause des hiles conidiens minces (Crous et al, 2000). En 2003 ce champignon a été affecté au genre *Pseudocercospora* à cause de la morphologie de son conidiophore qui a été jugée similaire à celle des autres *Pseudocercospora*. En outre, ce classement a été confirmé à la suite d'analyses moléculaires (Pretorius et al, 2003).

Il est à présent nommé *Pseudocercospora angolensis* (T. Carvalho & O. Mendes) Crous & U. Braun. La position du champignon dans l'embranchement Ascomycota est la suivante (Anonyme 2007) :

Embranchement : Ascomycota

Classe : Dothideomycetes

Sous-classe : Dothideomycetidea

Ordre : Capnodiales

Famille : Mycosphaerellaceae

Genre : *Pseudocercospora*

Espèce : *Pseudocercospora angolensis*

Les conidies cylindriques ou légèrement arrondies à l'apex (Figure 1.8), sont portées par des conidiophores densément fasciculés ou formant un synnemata de 12 à 45 µm de large (Kirk, 1986 ; Yesuf, 2002). Actuellement on ne connaît ni race physiologique, ni pathotype identifié, ni forme sexuée pour cette espèce (Anonyme, 1990). L'étude de la diversité génétique et de la structure de la population de *P. angolensis* à l'aide des marqueurs AFLP sur 109 isolats collectés dans 4 pays africains a montré une faible diversité génétique du champignon et confirmé le mode de reproduction asexué (Lan Bui Thi Ngoc, 2004).



**Figure 1.8.** Conidies de *P. angolensis* (Source Yesuf, 2002).

### **1.3.4 Biologie du champignon**

L'isolement de *P. angolensis* se fait en milieu artificiel et l'obtention des cultures pures est plus aisée lorsqu'on isole le champignon à partir des lésions au premier stade de leur évolution sur fruits. Le champignon se développe et sporule bien sur milieux artificiels tels que ceux constitués d'extraits de peau de fruits d'oranges ou d'extraits de feuilles d'orange mélangés à de l'agar (Emechebe, 1981). D'autres milieux tels que le V-8 agar, le V8-modifié par ajout de  $\text{CaCO}_3$ , le PDA ou le mycrophyl agar ont été testés avec succès (Ndzoumba, 1985 ; Yesuf, 2002). Toutefois, en raison des contaminations par d'autres parasites secondaires (*Colletotrichum*, *Phoma*, *Fusarium*) souvent observées et d'une croissance extrêmement lente du pathogène (Kuate et Fouré, 1988), la croissance mycélienne reste assez lente sur ces substrats. Les conditions optimales de croissance du champignon sont obtenues sur PDA à pH 6.5 et 25°C de température.

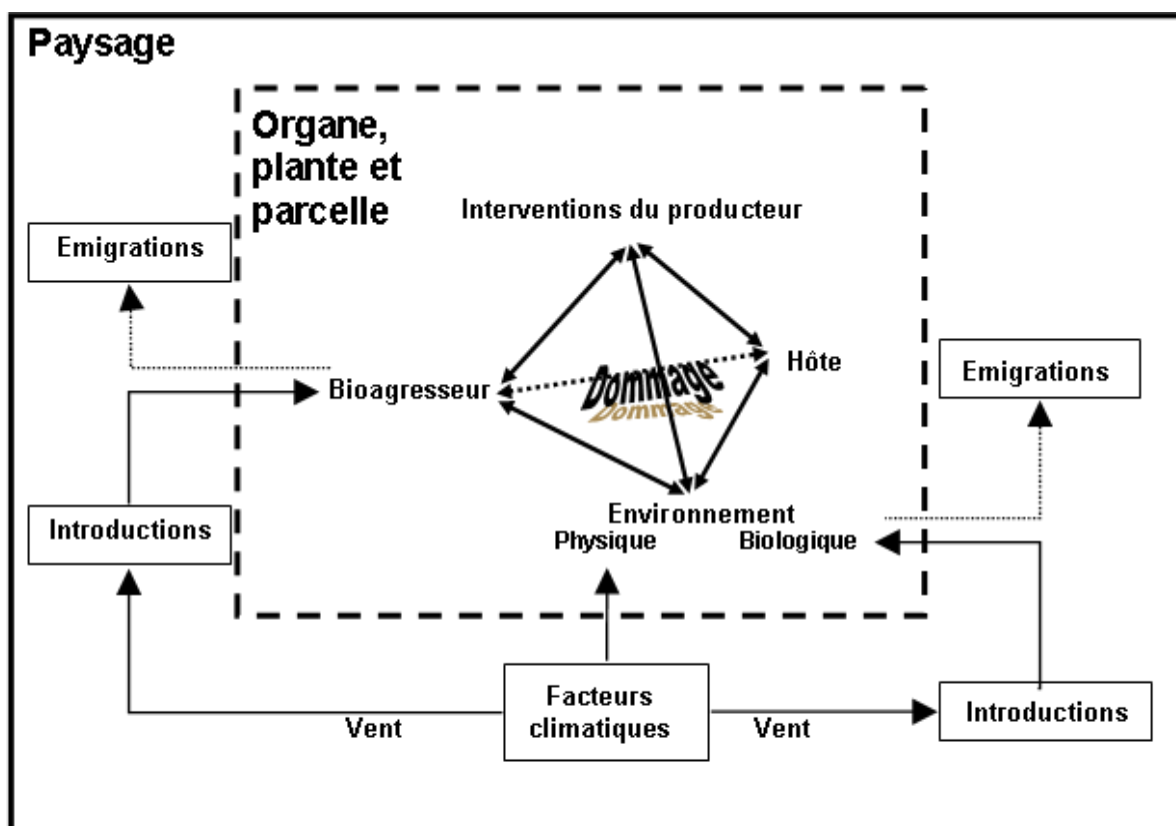
En dépit de son importance économique (dégâts causés sur les productions fruitières) et de son statut d'organisme de quarantaine pour l'Europe, la zone méditerranéenne et l'Amérique (Anonyme, 2009, Chunk & Timmer 2009), la biologie de *P. angolensis* est très peu connue. On suppose que les conidies sont responsables de l'infection, puisque le champignon n'est connu que sous sa forme anamorphe.

Les mécanismes de survie en milieu naturel ne sont pas maîtrisés (Yesuf, 2002). Une sporulation abondante est notée en conditions d'humidité, mais pendant la saison sèche, on note une activité ralentie. On admet que les organes malades (feuilles, fruits, branchettes) qui restent longtemps dans l'arbre constituent des réservoirs d'inoculum (Kuate, 2003). Certains auteurs ont démontré que les feuilles infectées constituent la principale source d'inoculum dans les vergers, tandis que les fruits sont une source subsidiaire. En effet, les lésions sur feuilles produisent près du double du nombre de conidies produit par les lésions sur fruits de la même taille. Les fruits joueraient un rôle plus important dans l'infection inter-fruits au sein d'un arbre (Seif & Hillocks, 1996).

### **1.3.5 Epidémiologie**

L'action d'un certain nombre de facteurs est requise pour qu'une infection donne lieu à une épidémie, il s'agit des facteurs environnementaux (climat, conditions physiques et biologiques du milieu) et des facteurs liés à la plante hôte et au parasite (Corbaz 1990). L'action du climat et de manière générale de l'environnement est complexe. Celui-ci agit à la fois directement et indirectement par l'intermédiaire de nombreuses interactions que l'on peut résumer schématiquement par le tétraèdre de la maladie (Figure 1.9). Les effets obtenus sur le développement des maladies sont dus aux interactions entre ces différents facteurs.





**Figure 1.9** Représentation conceptuelle des interactions aux échelles de l'organe, de la plante, de la parcelle et du paysage aboutissant à l'expression plus ou moins prononcée d'un dommage par un bioagresseur (au centre, la représentation tétraédrique de la maladie proposée par Zadocks et Schein, 1979).

En laboratoire, une étude sur quelques facteurs qui influencent l'infection des agrumes par *Phaeoramularia angolensis* a montré que l'infection sur feuilles est dépendante d'une grande quantité d'inoculum, de périodes de forte humidité excédant 24h et de températures modérées autour de 25°C (Seif & Hillocks, 1998). La germination des conidies sur feuilles, la pénétration du tube germinatif et la capacité de sporulation des lésions sont indépendantes du cultivar/espèce. Les facteurs qui déterminent le niveau de sensibilité sont la longueur de la période d'incubation et celle de la période latente. L'infection sur fruit ne nécessite pas de période d'humidité aussi longue que sur feuilles. Mais, le temps nécessaire pour l'infection croît avec l'âge du fruit.

En champ, l'étude du développement de la phaeoramulariose dans le temps a été réalisée au Cameroun en zone forestière humide de moyenne altitude (Kuate et al, 1994a ; Kuate et al, 1997) et en zone de haute altitude (Kuate et Fouré, 1988). L'expression parasitaire a également pu être observée à différentes altitudes variant de 80 à 1250m (Kuaté et al, 2002). D'autres études sur les facteurs qui affectent le développement de la maladie ont été effectuées au Kenya, en Ethiopie et en Guinée Conakry (Seif & Hillocks, 1996, 1998 ; Eshetu, 1999 ; Diallo, 2003).

Il ressort de ces travaux que les attaques les plus sévères de *P. angolensis* se font sur les organes jeunes. Les feuilles seraient plus réceptives pendant les 8 premières semaines. De façon générale, on observe pour les feuilles et les fruits une diminution de la sensibilité lorsque l'âge augmente. Toutefois, cette baisse de sensibilité se vérifie moins (surtout pour les

fruits) lorsqu'ils sont soumis à de longues périodes d'humidité. La pluie ou l'eau semblent jouer un rôle clé dans le développement de la maladie. En effet l'incidence de la maladie augmente pendant les périodes humides. Mais une différenciation entre le rôle de la pluie et celui de l'humidité relative n'a pas encore été vraiment faite. Néanmoins, une étude a permis de noter une réduction significative de la maladie sur des fruits produits pendant la saison sèche, suite aux floraisons décalées, provoquées par l'arrosage des arbres (Kuate et al, 1994a). En outre la phaeoramulariose des agrumes au Cameroun n'est observée que dans les zones humides. Dans les zones sèches au nord du pays, la maladie n'a pas encore été observée. (Kuate, 2003).

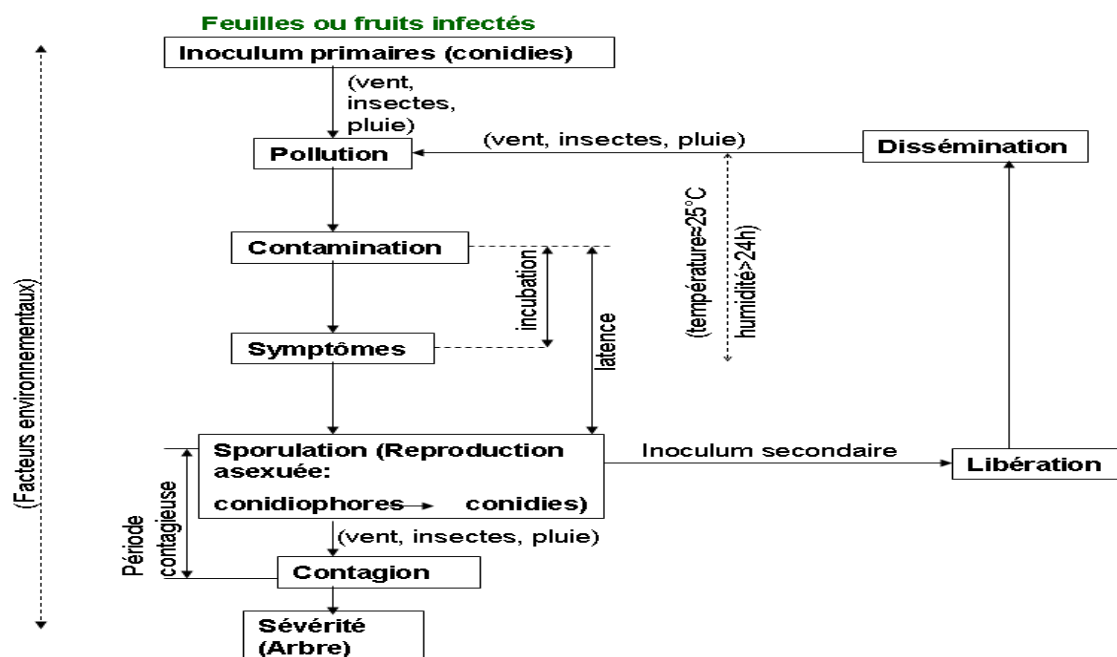
Il est convenu que le vent assure la dispersion des conidies. Généralement la contamination se fait à travers la dispersion de gouttelettes d'eau chargées de conidies provenant des feuilles infectées. La représentation schématique de l'épidémie de phaeoramulariose n'est pas connue, mais elle peut s'assimiler à la figure 1.10. Un des modèles décrivant la relation entre les facteurs environnementaux et la phaeoramulariose des agrumes proposé par Seif et Hillocks en 1996, était une combinaison de la pluviométrie, la température, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ce modèle n'a toutefois pas été retenu à cause des fortes colinéarités existant entre ces différentes variables. Le modèle température et pluviométrie a finalement été le plus approprié. On suppose que certains insectes peuvent également assurer la dispersion des conidies. Le cycle épidémiologique n'est en somme pas bien connu. Sur de grandes distances, la propagation de la maladie est assurée par l'homme à travers le déplacement d'un matériel végétal contaminé.

Plusieurs de ces travaux se sont aussi intéressés à l'effet de l'altitude sur l'incidence de la maladie. Cette dernière variait de façon croissante avec une élévation en altitude. Elle était plus marquée dans des zones à altitude moyenne et élevée. Au Cameroun, l'incidence de la maladie était très faible dans des zones d'altitude <200 m. Au Gabon, la présence de la maladie n'a été signalée que dans des zones situées au-delà de 350m d'altitude, il en est de même des Comores. En Guinée, les zones d'altitude > 400m ont été plus touchées par la maladie. Par contre, en Angola où la maladie a été découverte, le champignon est bien adapté aux différentes altitudes de la côte jusqu'à 2000m d'altitude. D'une manière générale, le rôle joué par la température à travers l'augmentation en altitude est jugé important. En effet dans la majorité des études, on constate une augmentation de l'incidence de la maladie avec une élévation en altitude.

Plusieurs de ces études ont également été effectuées en station de recherche, dans des plantations assez homogènes. Or, au Cameroun et dans plusieurs autres pays d'Afrique tropicale, les agrumes sont souvent cultivés au sein de systèmes agroforestiers complexes et diversifiés. La nécessité d'effectuer des études en milieu réel dans des plantations paysannes caractérisées par une diversité spécifique et des pratiques culturelles diverses s'impose. En outre, les paramètres impliqués dans le développement de la maladie ont été étudiés de façon isolée. L'importance de l'interaction entre ces différents paramètres n'a pas été mesurée.

Des attaques sévères ont été observées en Ethiopie, en milieu paysan, spécialement sur des arbres issus de plants de semis (Yesuf, 2002). Diallo (2003), qui a suivi les agrumes en collection et en plantations villageoises en Guinée, a montré que la sensibilité à *P. angolensis* varie en fonction de plusieurs facteurs dont le site, le suivi, la composition et l'âge des vergers, les périodes et fréquences d'application des fongicides, la couverture de la frondaison par les produits utilisés ainsi que leur adhérence. Il apparaît donc nécessaire à l'exemple d'autres travaux (Avelino, 1999), de prendre en considération tous facteurs liés à la plante,

son environnement et aux pratiques culturelles afin de déterminer les plus importants dans le pathosystème.



**Figure 1.10.** Représentation schématique de l'épidémie de phaeoramulariose (Adapté de Rapilly, 1991).

### 1.3.6 Sensibilité variétale

Initialement observé sur oranger, *P. angolensis* a été identifié sur la presque totalité des agrumes y compris le bigaradier. Des attaques de *P. angolensis* ont également été observées au Cameroun sur *Citropsis tanakae* et *balsamocitrus* qui sont des Rutacées sauvages (Kuate et al, 1994 ; Kuate, 2003).

Environ 120 espèces et variétés d'agrumes ont été évaluées au Cameroun pour leur comportement vis-à-vis de la phaeoramulariose, et aucune résistance prononcée n'a été identifiée (Bella-Manga et al, 1999). Toutefois, une variabilité importante a été constatée dans les niveaux de sensibilité des cultivars. Ainsi, les pomélos (*Citrus paradisi* Macf.) et certains mandariniers (*C. reticulata* Blanco) se sont révélés très sensibles, tandis que les orangers (*C. sinensis* (L.) Osbeck) et d'autres mandariniers sont jugés moyennement sensibles. Les limettiers de Tahiti (*C. latifolia* Tan.), les satsumas (*C. unshiu* Marc.), les citronniers (*C. limon* (L. Burm. F.) et les pamplemoussiers (*C. grandis* (L.) Osbeck) sont considérés comme peu sensibles. Ce classement a été confirmé par d'autres études menées sur ces espèces, en effectuant des observations sur des arbres, ou sur des feuilles détachées ayant subi des inoculations de *P. angolensis* (Seif & Hillocks, 1996 ; 1998 ; 1999 ; Diallo, 2003).

Il est admis que la sensibilité de certaines espèces ou variétés d'agrumes varie avec les zones géographiques (Kuate et Fouré, 1988 ; Kuate et al, 1994 ; Diallo, 2001 ; Kuate et al 2002). Ainsi certaines variétés de citronniers (Villafranca et Lisbonne) considérées comme peu sensibles ont été classées très sensibles au Kenya lors d'une étude portant sur 14 cultivars d'agrumes (Seif & Hillocks, 1999). Il en est de même pour les limettiers qui au Gabon, ont

présenté des taux d'attaques sévères (Brun, 1972). Les feuilles des agrumes semblent moins sensibles que les fruits, bien qu'aucune relation entre les taux d'attaques sur feuilles et sur fruits n'ait été établie (Bella-Manga *et al*, 1999).

### **1.3.7 Méthodes de lutte**

#### **1.3.7.1 Lutte chimique**

La lutte contre cette maladie est essentiellement basée sur l'utilisation des produits chimiques. Les fongicides cupriques (oxyde de cuivre ou hydroxyde de cuivre) et les benzimidazoles (bénomyl) ont donné de bons résultats. Cependant, pour éviter le phénomène de résistance au bénomyl survenu dans plusieurs pathosystèmes, des traitements alternant le bénomyl (fongicide systémique) et l'hydroxyde de cuivre (fongicide de contact multisite) sont très conseillés (Seif & Hillocks, 1993 ; Kuate, 1998). Au Kenya, ce sont les triazoles (fluzilazole) qui sont préconisés (Seif & Hillocks, 1999). En Ethiopie, l'utilisation du Benlate (bénomyl), du Score (difénoconazole) ou du Cuproxat (sulfate de cuivre) a permis de réduire l'incidence et la sévérité de la maladie (Yesuf, 2007). En Guinée, l'utilisation du Benlate en alternance avec le Dithane M-45 (80% de manèbe) est préconisé pour éviter le développement des résistances (Diallo, 2001 ; 2003).

Ces traitements sont effectués tous les 15 jours pendant la saison fruitière, dès la nouaison et jusqu'à la récolte (Kuate, 2003 ; Yesuf, 2007). Pour les petits producteurs qui fournissent la majorité des productions d'agrumes sur le marché, ces traitements sont longs et coûteux. Trois fréquences d'application (10 jours, 20 jours et 30 jours) de fongicides utilisés en Guinée (Benlate et Dithane M-45) ont été comparées (Diallo, 2003). Les résultats obtenus montrent que la fréquence de 10 jours est celle qui offre une meilleure protection avec 90% de fruits commercialisables. Ces résultats amènent à des interrogations sur la rentabilité de la méthode et surtout le respect de l'environnement.

La connaissance de la dynamique de l'inoculum en milieu naturel pourrait permettre de mieux cibler les périodes de traitement et en réduire les fréquences. Une méthode de lutte associant la maîtrise des facteurs de risque des différents sites, l'utilisation des variétés peu sensibles (en fonction des sites) avec des traitements chimiques donnerait de meilleurs résultats. En effet, la baisse de sensibilité des cultivars conduirait à une faible pression parasitaire pouvant être contrôlée par un traitement d'appoint. Au Cameroun, dans les parcelles paysannes, aucune stratégie de lutte phytosanitaire n'est généralement utilisée pour protéger les agrumes (Ndo, 2007). Très souvent seuls les arbres présents dans les cacaoyères et les caféières bénéficient des traitements apportés à ces cultures principales. Mais ces traitements visent généralement à lutter contre des maladies autres que la phaeoramulariose. En général, l'application des traitements chimiques sur agrumes par les petits producteurs est très difficile. Le coût élevé des fongicides recommandé et le manque d'équipements adéquats sont les principales raisons de cette difficulté (Yesuf, 2002).

### **1.3.7.2 Utilisation des huiles essentielles**

Les propriétés antifongiques des huiles essentielles ont été démontrées dans plusieurs études. Ces composés naturels d'origine végétale ont en effet été utilisés dans la lutte contre plusieurs maladies et ravageurs (Knobloch *et al* 1989; El Ajjouri *et al* 2008; Mawussi *et al*, 2009). Des travaux ayant pour but de tester l'effet des huiles essentielles d'agrumes sur la croissance mycélienne de *P. angolensis* ont été effectués au Cameroun. Ils ont permis de constater que la croissance mycélienne de ce champignon était fortement inhibée par les huiles extraites de lime Tahiti (*Citrus latifolia*) et du citronnier Eurêka (*C. limon*) (Jazet-Dongmo *et al*, 2002). Ces deux variétés sont classées dans le groupe des génotypes peu sensibles à la phaeoramulariose. Par contre, les huiles essentielles des autres variétés peu sensibles (pamplemoussier Reinking, Satsuma Saint Jean) ou très sensibles (pomelo Reed, oranger Valencia Late), n'ont provoqué qu'une faible inhibition de cette croissance mycélienne.

Ces travaux ont permis par la suite d'étudier la possibilité d'exploiter les huiles essentielles de *C. latifolia* dans la lutte contre *P. angolensis* (Jazet-Dongmo *et al*, 2008). L'effet des huiles essentielles d'autres espèces telles *Eucalyptus camaldulensis* et *E. saligna* ainsi que *Callistemon citrinus* et *C. rigidus* sur *P. angolensis* a également été démontrée (Jazet-Dongmo *et al*, 2008 ; 2009).

L'utilisation des huiles essentielles des génotypes résistants à la phaeoramulariose a été envisagée pour la recherche visant à identifier les sources de résistance des espèces d'agrumes (Kuate *et al*, 2006b). Ces travaux de recherche devront se poursuivre pour trouver de nouvelles sources de résistance susceptibles d'être utilisées pour des croisements intra ou interspécifiques afin de développer des plants résistants.

### **1.3.7.3 Mesures d'assainissement et pratiques culturales**

Des mesures d'assainissement telles que la collecte et la destruction des feuilles, fruits, branches et plants malades ont été recommandées au Kenya (Seif & Kungu, 1989 ; Seif, 1996).

Ces mesures, qui visent à diminuer l'inoculum primaire afin de faire baisser l'incidence de la maladie, ont également été largement utilisées en Ethiopie (Eshetu, 1999). D'autres pratiques visant à créer un environnement défavorable à l'agent pathogène ont été recommandées au Kenya. Il s'agit de :

- La plantation des haies vives autour des vergers. Ces derniers joueraient un rôle de brise-vent et permettraient ainsi de minimiser l'impact du vent principal facteur de dispersion des conidies ;
- L'émondage ou l'élagage des plants permettrait une aération de la canopée des arbres afin d'éviter des microclimats d'humidité favorables à la maladie (Yesuf, 2002).

L'efficacité de toutes ces mesures n'a pas encore été démontrée.



## ***Chapitre 2 :***

### ***Illustration de la composition et de la structure des peuplements à base d'agrumes***



## **Chapitre 2 : Illustration de la composition et de la structure des peuplements à base d'agrumes**

### **2.1 Introduction**

Les agrumes se retrouvent généralement dans trois types de systèmes de production au Cameroun. Ils peuvent être plantés dans des jardins autour des maisons. Dans ce cas, ils sont plantés isolés, en groupe, en association avec d'autres fruitiers et/ou des cultures annuelles. Dans ce type de système, l'objectif premier n'est pas la production. Les arbres sont surtout plantés pour le marquage de terrain, l'ombrage ou l'ornement. Les agrumes peuvent également être plantés au sein des vergers. La taille et la composition de ces vergers est variable. Ces vergers peuvent comporter une ou plusieurs espèces d'agrumes. Ces vergers sont retrouvés dans plusieurs bassins de production, mais sont assez rares comparés aux parcelles agroforestières. Le système agroforestier est en effet celui dans lequel se retrouvent principalement la plupart des agrumes au Cameroun (Aulong et al, 2000 ; Ndo, 2007). Dans ce système, les cacaoyers ou caféiers sont les cultures principales. Ils sont associés aux arbres forestiers et aux fruitiers. Plusieurs familles de fruitiers peuvent être plantées dans la même parcelle (manguiers, avocatier, agrumes...). Dans plusieurs de ces exploitations, outre ces cultures pérennes, les cultures vivrières annuelles ou pluriannuelles (maïs, macabo, manioc...) sont présentes (Jagoret et al, 2009). Le choix des systèmes et des espèces ainsi que leur répartition obéissent aux stratégies paysannes (Torquebiau, 2007).

Pour mieux comprendre l'évolution de la maladie dans ces systèmes de production d'agrumes, il nous est apparu important de les décrire afin de connaître les interactions qui peuvent entrer en jeu dans l'épidémiologie de la maladie. En effet, les motifs de dispersion spatiale de la maladie observés peuvent être l'expression d'interactions complexes entre plusieurs facteurs parmi lesquels la disposition spatiale des plants dans une parcelle (Madden, 2005 ; Sparks *et al*, 2008). Nous émettons l'hypothèse que la connaissance de la composition et de la structure spatiale d'un peuplement, peut éclairer la compréhension de la répartition et de l'intensité de la maladie au sein de ce peuplement.

Nos travaux se sont effectués dans les 3 types de systèmes de production d'agrumes. Cependant, nous ne nous intéresserons qu'au système agroforestier et au système de verger car la répartition des arbres dans les jardins autour des maisons peut être à une échelle réduite semblable à celle d'un verger ou celle d'une parcelle agroforestière.

L'objectif de ce chapitre est de comparer la composition et la structure spatiale de deux parcelles appartenant à deux systèmes de production différents. La connaissance de la structure spatiale pourrait conduire à une meilleure compréhension de la répartition et de l'intensité de la phaeoramulariose des agrumes dans ces différents systèmes.

Ce travail est effectué à travers une analyse de semis de points hétérogènes par la méthode de Ripley. C'est une méthode qui a été conçue à l'origine pour analyser la structure des peuplements forestiers hétérogènes (Goreaud & Pélissier 1999).

## **2.2 Matériel et méthodes**

### **2.2.1 Présentation Sites et parcelles**

#### **a- Verger**

Le verger d'agrumes est situé à Kumba dans le village d'Ekiliwindi (4°45'N de latitude ; 9°29'E de longitude ; altitude 300m), dans la région du Sud-Ouest. La pluviométrie moyenne annuelle est de 2300mm, l'humidité relative de 82% et la température moyenne annuelle de 27°C. C'est un verger comportant plusieurs espèces d'agrumes. Les arbres sont plantés à des écartements réguliers de 6m x 6m.

#### **b- Système agroforestier**

La parcelle agroforestière à base de cacaoyers est située dans le village nommé Abanda (4°38' N de latitude ; 11°09' E de longitude ; altitude 488 m), au sud de l'arrondissement de Bokito dans la région du Centre Cameroun. La pluviométrie moyenne annuelle est 1300 mm, l'humidité relative moyenne est de 76% et la température moyenne annuelle est de 25°C. Cette parcelle comprend des cacaoyers, des arbres forestiers et fruitiers et des cultures vivrières. En dehors des cacaoyers pour lesquels les distances entre les plants sont assez régulières (3 m x 3 m), les distances entre les arbres sont mal connues et irrégulières.

### **2.2.2 Cartographie des parcelles**

Chaque parcelle a été insérée dans un dispositif rectangulaire dont le cadre constituait un repère orthonormé. La constitution de ce repère s'est faite avec une orientation Nord-Sud à l'aide d'un GPS, de mètre-rubans et de ficelles. L'origine du repère ou point 0 a été placée à un angle de la parcelle. Des carrés de 10 m de côté ont été découpés de manière progressive à partir de l'origine. A l'intérieur de chaque carré, toutes les plantes pérennes ont été recensées et identifiées. Des coordonnées (X, Y) du repère orthonormé ont été attribuées à chacune de ces plantes et notées. La parcelle agroforestière de Bokito n'ayant pas une forme rectangulaire, des portions de parcelles de cultures vivrières voisines ont été insérées dans le dispositif.

Le protocole d'analyse de structure spatiale a été utilisé pour la parcelle agroforestière. S'agissant du verger de Kumba, les distances entre les plants étant connues, il a plus été question de localiser les différentes espèces et les vides laissés par les arbres manquants dans la parcelle. Pour cette parcelle, on avait donc déjà une idée de la structure spatiale. Cette idée sera confirmée par la carte de la parcelle. Les éléments de méthodologie qui suivent auront donc pour objectif d'identifier l'organisation spatiale des différents composants (forestiers, fruitiers, agrumes...) au sein du système agroforestier.

### **2.2.3 Constitution des sous-populations d'arbres**

L'analyse de la structure spatiale se fait au sein des sous-populations. Une sous-population est un groupe d'éléments dynamiques avec un même processus ponctuel à l'origine (Ngo Bieng et al 2011). Dans le cadre de cette étude, des sous-populations d'arbres ont été formées en fonction des grands types ou des familles répertoriés dans la parcelle (arbres forestiers, fruitiers autres qu'agrumes, cacaoyers, palmiers, bananiers et agrumes). Les sous-populations d'arbres ont été constituées avec pour principe d'avoir au moins 10 individus par sous-population. Chaque sous-population a été représentée sur une carte pour permettre de visualiser le positionnement des individus par sous-population. Une représentation de la population entière avec des marques différentes par sous-population a également été effectuée. Cette représentation a permis de voir la position relative des individus de chaque sous population dans la parcelle.

Le verger d'agrumes de Kumba est constitué d'une seule population. Dans un souci d'illustration de la diversité spécifique du verger, nous avons représenté chaque espèce avec des marques différentes, mais toutes ces espèces appartiennent à la même population.

### **2.2.4 Analyse de la structure spatiale des sous-populations**

L'objectif de cette analyse est de connaître la structure spatiale ou le mode de répartition des individus des différentes sous-populations dans la parcelle. Ceci permet d'appréhender la complexité des systèmes dans lesquels se déroulent nos travaux. Chaque arbre était représenté par un point. Il s'agit de savoir si les semis de points (différentes sous-populations) sont repartis selon une structure aléatoire, régulière ou agrégée. Pour chaque sous-population la fonction  $L(r)$  de Besag a été utilisée (Goreaud, 2000). Cette fonction est une méthode basée sur les distances. Elle permet de dire si la structure spatiale d'un semis de point est régulière ou agrégée pour plusieurs distances  $r$ . La fonction  $L(r)$  dérive de la fonction  $K$  de Ripley. Cette fonction caractérise la structure de voisinage autour d'un point. Elle est utilisée pour un processus de ponctuel homogène et isotrope de densité  $\lambda$ .

$$K(r) = \lambda^{-1}E(r)$$

Où  $E(r)$  est l'espérance du nombre de points à l'intérieur d'une distance  $r$  d'un point quelconque du semis de points.

L'intensité moyenne des points  $\lambda$  peut être estimée par leur densité  $n/A$ , où  $n$  est le nombre total de points et  $A$  la surface totale échantillonnée.

Pour le processus de Poisson (distribution aléatoire), qui sert d'hypothèse nulle, l'espérance du nombre de voisins  $E(r) = \lambda \pi r^2$ , et donc  $K(r) = \pi r^2$ . Pour un processus agrégé, les points ont en moyenne plus de voisins que pour l'hypothèse nulle, et donc  $K(r) > \pi r^2$ . Inversement, pour un processus régulier, les points auront en moyenne moins de voisins que pour l'hypothèse nulle, et  $K(r) < \pi r^2$ .

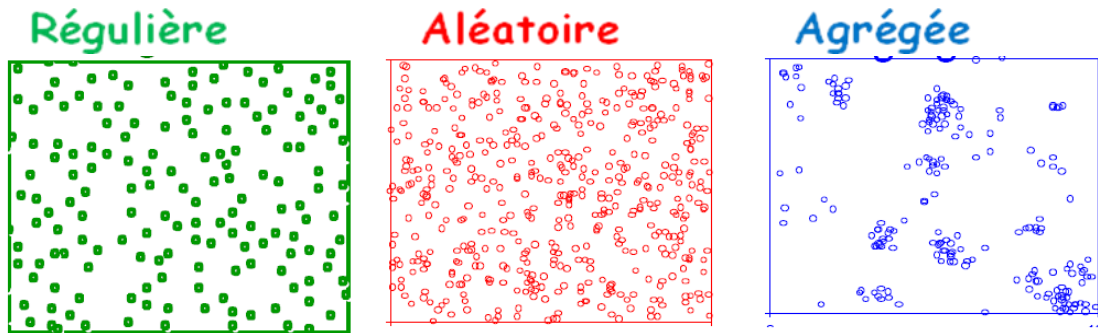
$K$  est l'espérance du nombre de voisins autour de chaque point (chaque arbre).  $K$  régulier  $< K$  aléatoire  $< K$  agrégé (Goreaud, 2000 ; Walter 2006).

La fonction  $K(r)$  n'étant pas facile à interpréter car la courbe obtenue pour l'hypothèse nulle est une parabole,  $L(r)$  qui dérive de cette dernière a été utilisée.

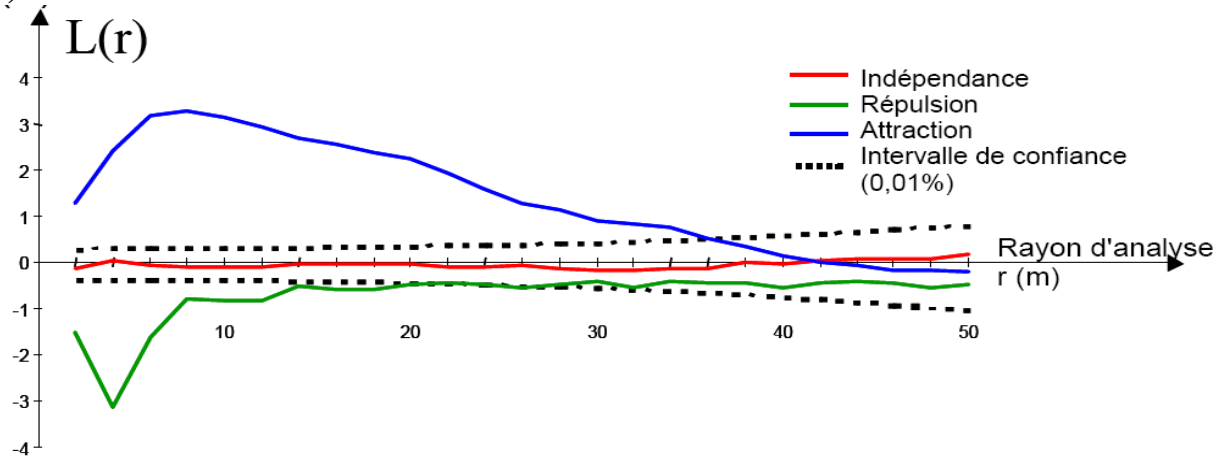
$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

$L(r) = 0$  indique une distribution aléatoire,  $L(r) > 0$  : distribution agrégée,  $L(r) < 0$  : distribution régulière (Figure 2.1).

a)



b)



**Figure 2.1.** Illustration des structures spécifiques régulière, aléatoire et agrégée (a) ; Courbes de la fonction Ripley  $L(r)$  pour les structures régulière, aléatoire et agrégée (b) (d'après Goreaud, 2000).

La fonction  $L(r)$  permet de mieux prendre en considération les points situés en bordure des parcelles. Elle est également normalisée et permet donc de comparer la structure des semis n'ayant pas le même nombre de points. Cette analyse a été effectuée avec le package `ads` du logiciel R version 2.13.1. Un test local de signification de l'hypothèse nulle d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR) est proposé par la méthode de simulation de Monte Carlo (Besag & Diggle 1977 in Goreaud, 2000 ; Lancaster & Downes, 2004).

## 2.2.5 Hétérogénéité et correction des effets de bord

La fonction  $L(r)$  s'utilise pour un processus ponctuel homogène. Du fait de la forme de la parcelle et de l'insertion de portions de parcelles de cultures vivrières voisines, le dispositif de Bokito a présenté une forte hétérogénéité. Celle-ci s'est illustrée par la présence « d'espaces vides » à l'intérieur de la parcelle. Goreaud et Pelissier (1999) proposent de corriger cette forme d'hétérogénéité en procédant à un découpage des espaces vides ou que l'on veut éliminer. Ce découpage se fait par triangles des espaces. Cependant, cette correction accentue le phénomène des effets de bord qui deviennent ainsi très importants dans l'analyse des dispositifs aux formes complexes et rend l'interprétation des analyses spatiales difficile sur de grandes distances. En effet, plus de la moitié de la surface analysée se retrouve en dehors de la parcelle, de sorte que les analyses ne sont plus très fiables sur de grandes distances. Suite à cela nous ne pourrions mieux interpréter que les résultats obtenus sur des petites distances dans la parcelle de Bokito.

## 2.3 Résultats

### 2.3.1 Composition de chaque sous population

#### a- Verger

La parcelle de Kumba a une superficie de 23.540 m<sup>2</sup> (107m x 220m). Elle est constituée d'une population d'agrumes comprenant cinq espèces. Les orangers constituent l'espèce dominante, ils forment près de 90% de la population. Le reste de la population est formé par ordre d'importance de limes, de pamplemoussiers et de mandariniers Satsuma. (Tableau 2.1).

**Tableau 2.1.** Composition en nombre d'espèces de la parcelle de Kumba.

Espèce	Nombre d'individus	Noms scientifique
Oranger	641	<i>Citrus sinensis</i>
Satsuma	9	<i>Citrus unshiu</i>
Pomélo	7	<i>Citrus paradisi</i>
Pamplemoussier	23	<i>Citrus maxima</i>
Lime Tahiti	29	<i>Citrus latifolia</i>

#### b- Système agroforestier

La parcelle Bokito a une superficie de 19.188 m<sup>2</sup> (123 m x 156 m). Les cacaoyers constituent la sous-population la plus nombreuse dans la parcelle (Tableau 2.2). Les agrumes sont la 2<sup>ème</sup> sous-population la plus importante. Les bananiers, les fruitiers, les arbres forestiers et les palmiers à huile sont par ordre d'importance les 4 autres sous-populations de la parcelle.

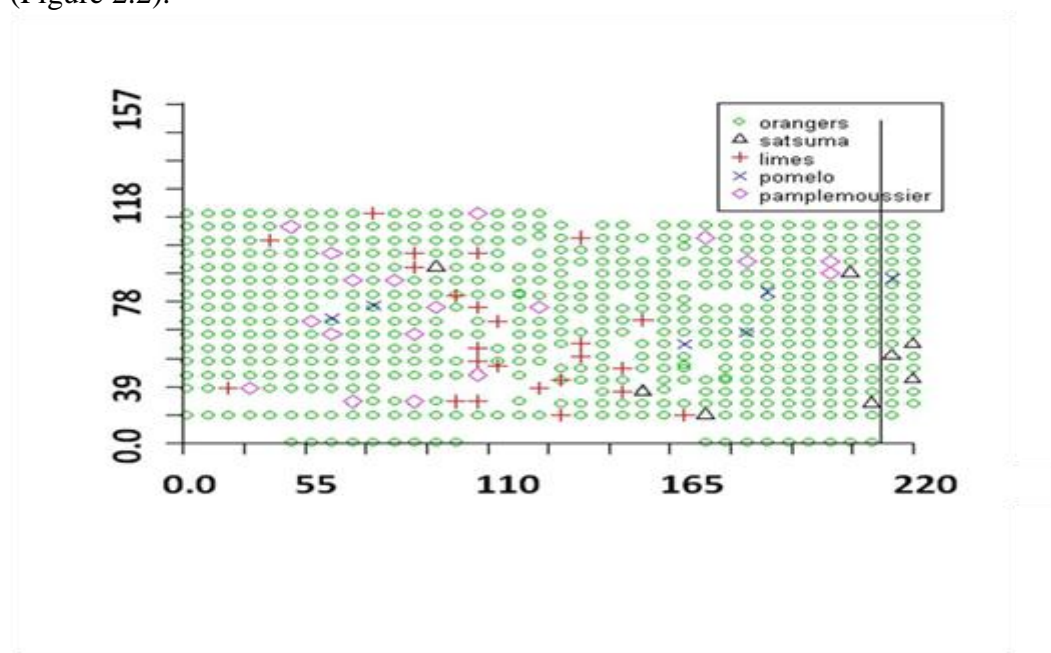
**Tableau 2.2.** Composition en nombre d'arbres et espèces de la parcelle de Bokito.

Sous-population	Nombre d'individus	Nombre d'espèces	Noms scientifiques
Forestiers	30	7	<i>Cola acuminata</i> , <i>Chlorophora excelsa</i> , <i>Ficus mucuso</i> , <i>Mitragyna ciliata</i> , <i>Voacanga africana</i> , <i>Myrianthus arboreus</i> , <i>Adansonia digitata</i> ,
Fruitiers	58	6	<i>Persea africana</i> , <i>Annona muricata</i> , <i>Psidium guajava</i> , <i>Dacryodes edulis</i> , <i>Mangifera indica</i> , <i>Spondias dulcis</i>
Bananiers	63		<i>Musa sp</i>
Palmiers à huile	16	2	<i>Elaeis guineensis</i> .
Cacaoyers	374	1	<i>Theobroma cacao</i>
Agrumes	172	3	<i>Citrus reticulata</i> , <i>Citrus sinensis</i> , <i>Citrus paradisi</i>

## 2.3.2 Représentation graphique des sous-populations

### 2.3.2.1 Verger

C'est une parcelle constituée d'une seule sous-population. Cinq espèces d'agrumes constituent cette sous-population. Ces espèces sont illustrées par des marques différentes (Figure 2.2).



**Figure 2.2.** Représentation graphique de la disposition des espèces dans la sous-population d'agrumes de la parcelle de Kumba.

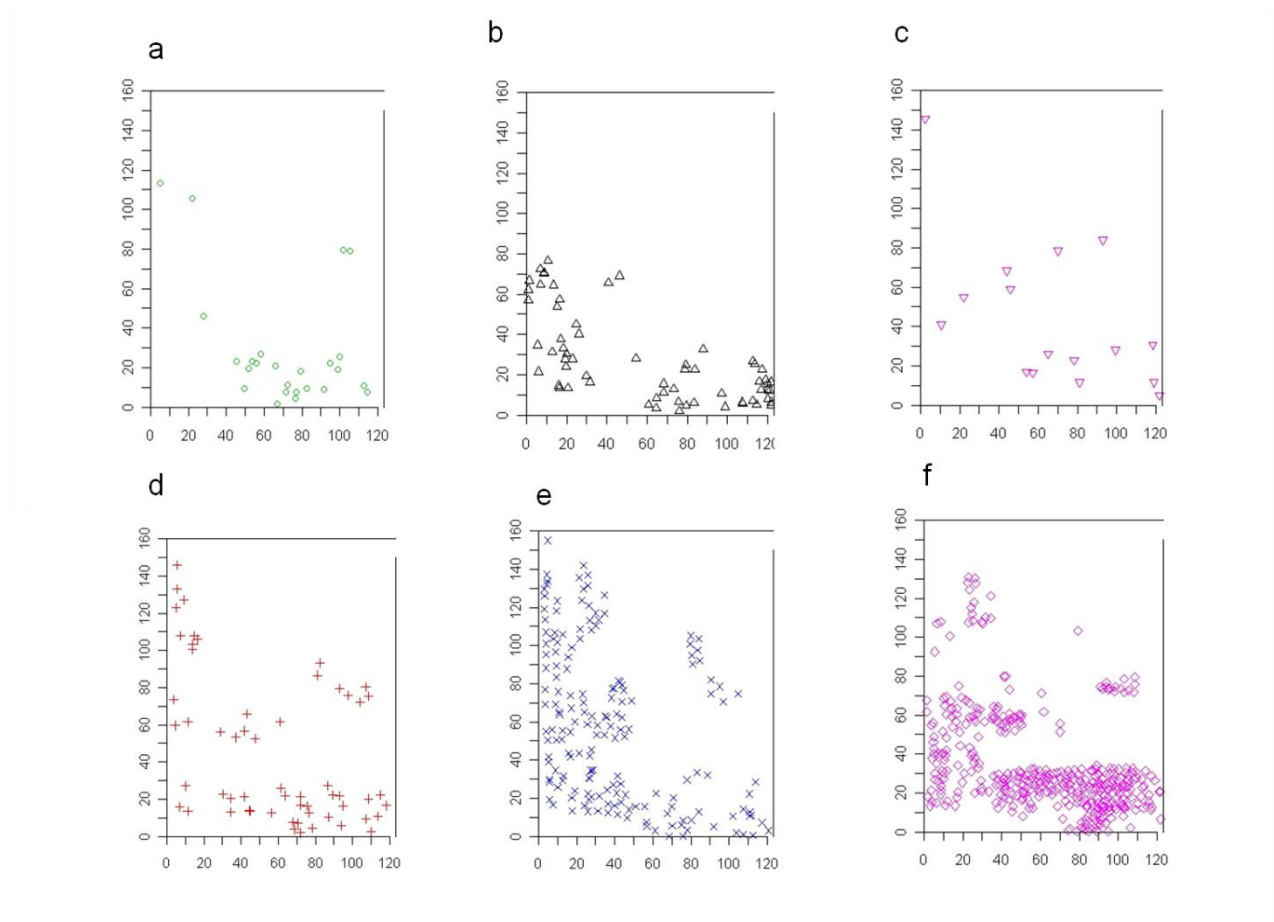
### 2.3.2.2 Système agroforestier

Chaque sous population a été représentée dans la parcelle (Figure 2.3) ; On constate sur chacune des cartes, un semis de points hétérogène avec des amas d'individus à plusieurs secteurs de la parcelle. Les distances entre cacaoyers semblent très réduites à certaines

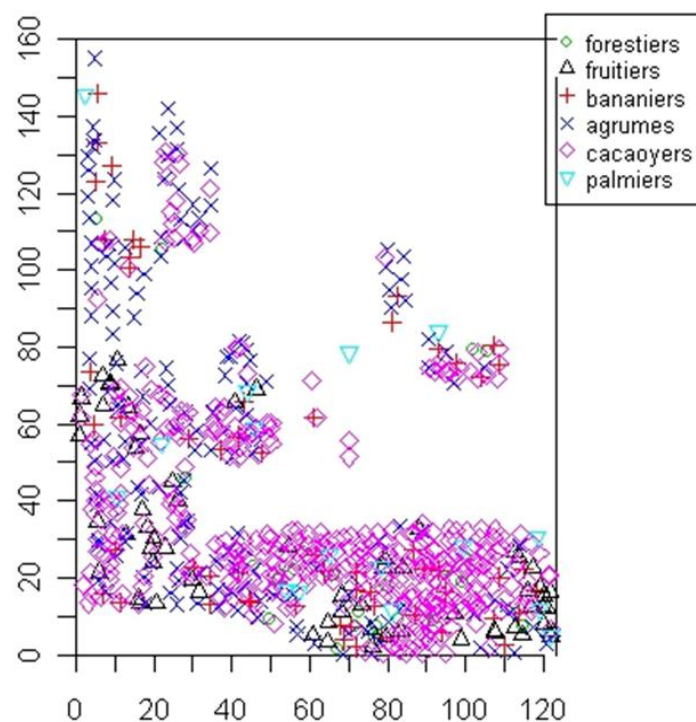


portions de la parcelle, les points sur la carte sont pratiquement collés les uns aux autres (Figure 2.3f).

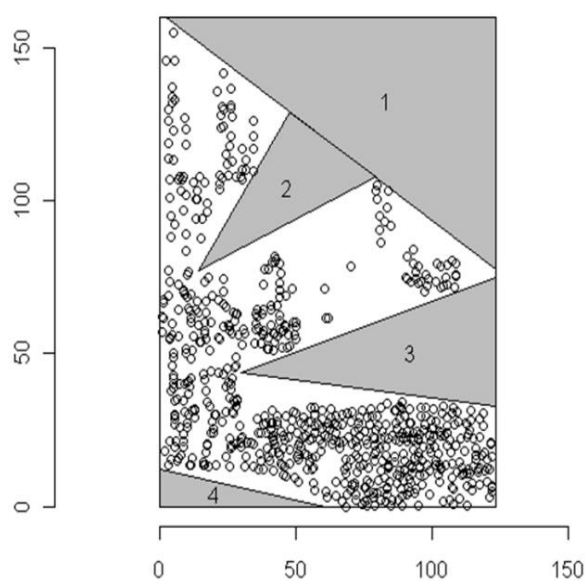
La représentation de la population entière permet de mieux apprécier la complexité du système (Figure 2.4). Les arbres de différentes espèces et différentes sous-populations sont entremêlés et forment un semis de point très hétérogène. Plusieurs secteurs de la parcelle semblent vides, mais en réalité la parcelle n'est pas rectangulaire. C'est une parcelle de forme imprécise qui s'emboîte avec les parcelles voisines. Ces parcelles sont des champs de cultures vivrières. Pour nous consacrer uniquement aux arbres et résoudre le problème d'hétérogénéité (Goreaud 2000) causé par ces parcelles de viviers, la parcelle a été modifiée pour être plus proche de la réalité. La parcelle de Bokito modifiée est représentée sur la figure 2.5. C'est sur cette surface complexe que les fonctions  $L(r)$  ont été calculées pour chaque sous population.



**Figure 2.3.** Représentation graphique des sous populations de forestiers (a), bananiers (b), palmiers (c), fruitiers (d), agrumes (e) et cacaoyers (f) dans la parcelle de Bokito.



**Figure 2.4.** Représentation de l'ensemble des sous-populations dans la parcelle de Bokito

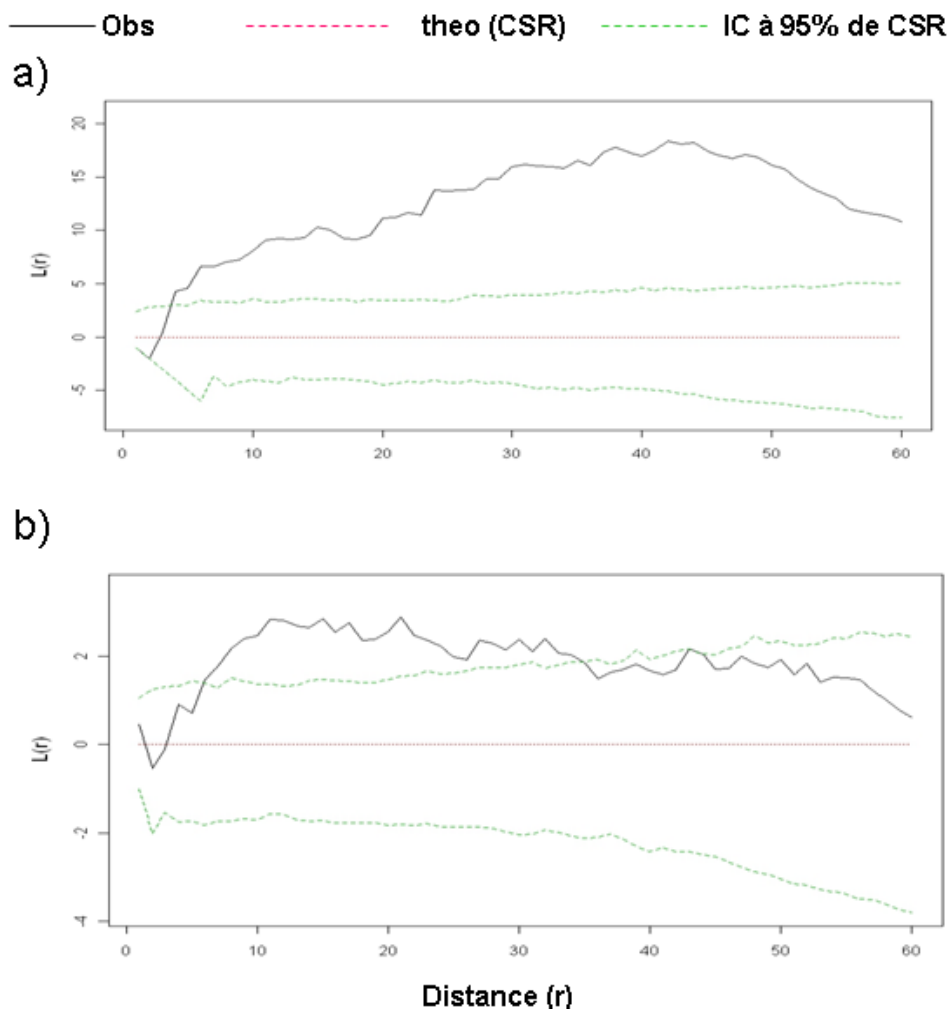


**Figure 2.5.** Représentation graphique de la parcelle modifiée de Bokito.

### 2.2.3 Analyse de la structure de chaque sous-population

La fonction  $L(r)$  a été calculée pour chaque sous-population. Elle nous a permis de déterminer la structure spatiale de chaque sous population. En ce qui concerne les forestiers (Figure 2.6a), nous avons une agrégation significative à partir de 4 m. Aux grandes distances, la courbe reste en dehors de l'intervalle de confiance. Ceci nous amène à penser que l'hétérogénéité n'a pas été totalement corrigée. De plus au vu de notre parcelle, aux grandes distances, les effets de bord sont multipliés. L'interprétation de cette courbe sur de grandes distances ne serait donc pas fiable.

S'agissant des fruitiers, de 7 à 32 m (distance pour laquelle la courbe sort de l'intervalle de confiance), la structure présente une agrégation significative (Figure 2.6b). On constate une correction de l'hétérogénéité car la courbe se retrouve dans l'intervalle de confiance aux grandes distances. La répartition homogène des semis de points peut d'ailleurs être vérifiée sur la cartographie (Figure 2.3d)

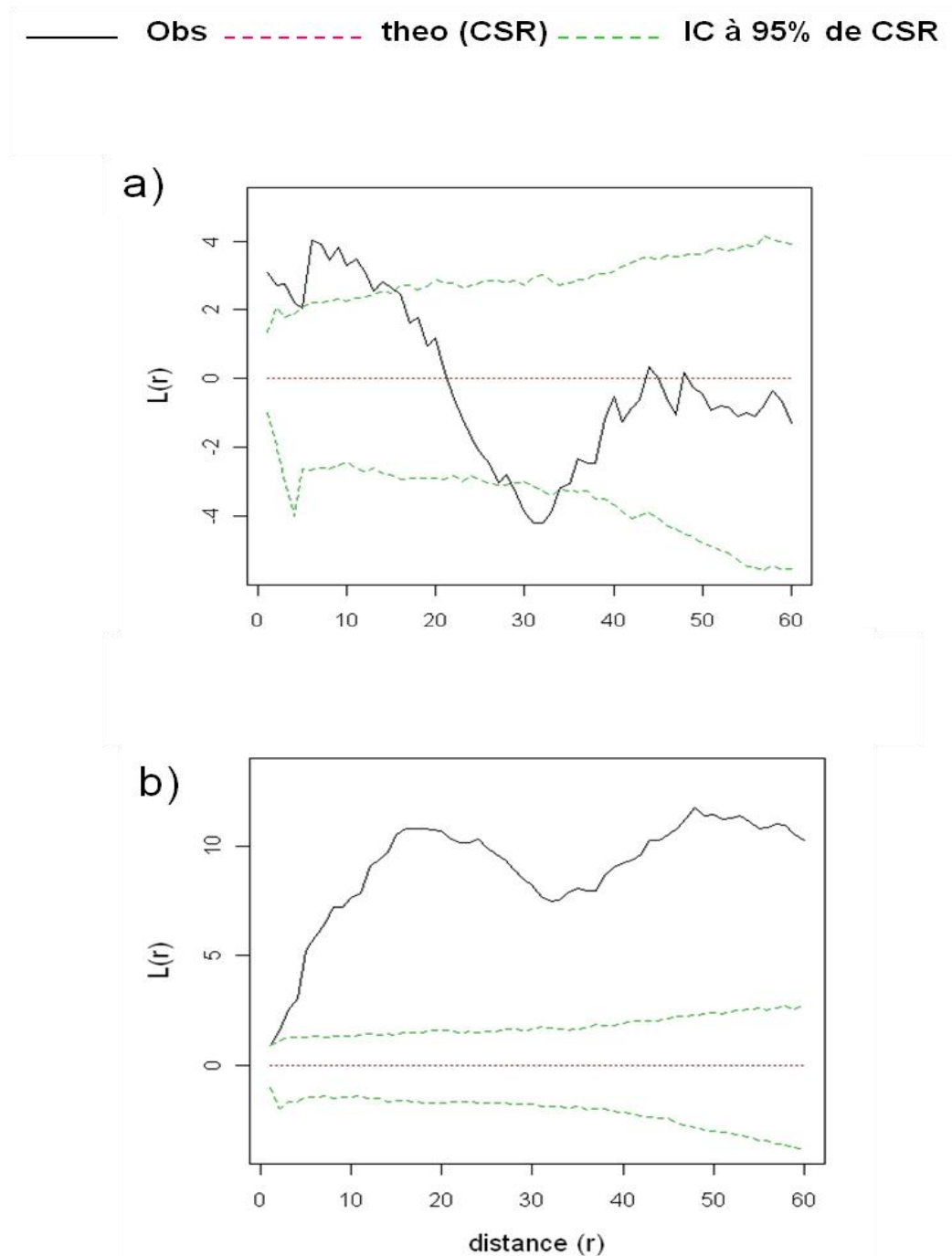


**Figure 2.6.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous population des forestiers a) et fruitiers b) de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

Pour les palmiers, nous avons une agrégation jusqu'à 18m et un pic de régularité à 30 m. D'après Goreaud (2000), La distance à laquelle la fonction atteint sa valeur maximale

représente la distance de l'ordre du rayon des agrégats. La courbe dans ce cas atteint son maximum aux alentours de 5 m. Dans le cas des palmiers, nous avons donc des agrégats de 5 m de rayon régulièrement distribués tous les 30 m (Figure 2.7a).

Au niveau des bananiers, nous avons des agrégats d'environ 15m de rayon, mais la structure est hétérogène car la courbe se maintient en dehors de l'intervalle de confiance aux grandes distances d'analyse. (Figure 2.7b).

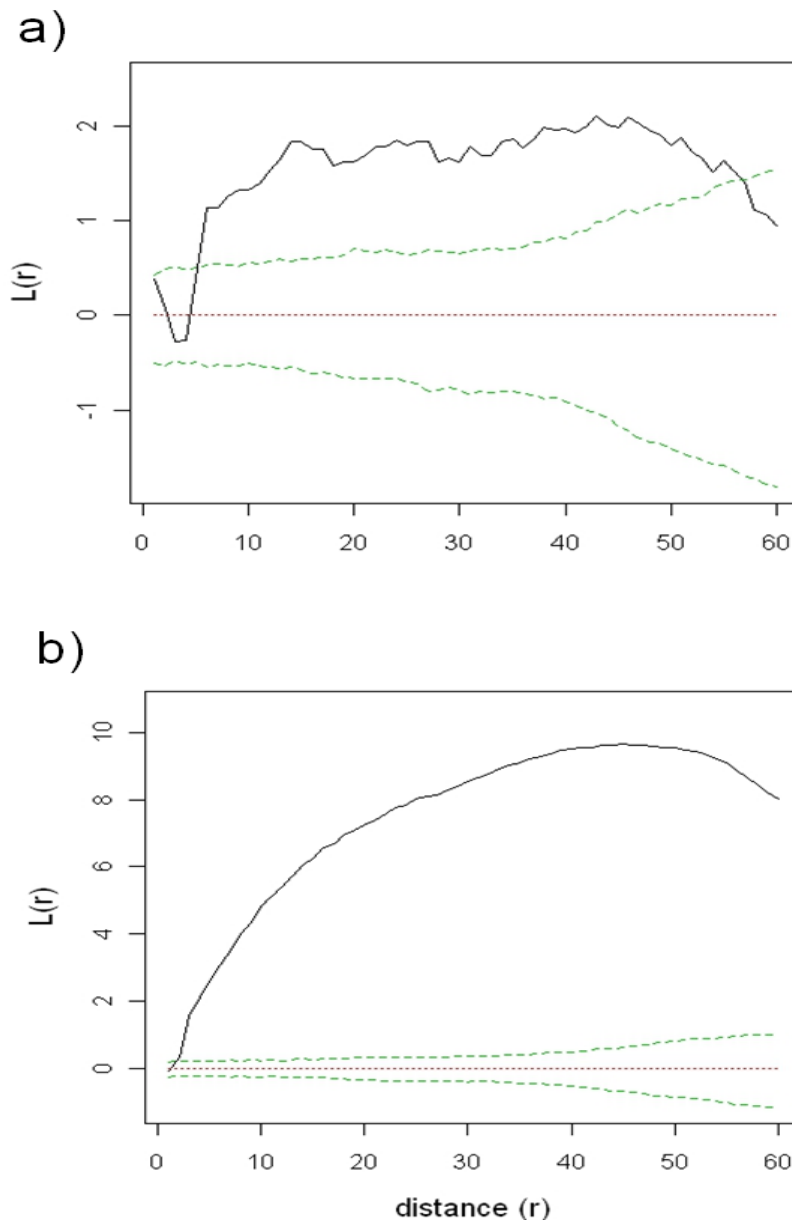


**Figure 2.7.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous population de palmiers a) et bananiers b) de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

La sous population des agrumes présente une agrégation, à partir de 5 m. La structure est homogène car la courbe redescend dans l'intervalle de confiance. Ici, la courbe présente plusieurs pics ce qui laisse supposer qu'il ya une superposition de plusieurs échelles d'agrégation (Figure 2.8a).

La structure des cacaoyers est agrégée et très hétérogène (Figure 2.8b). Cette hétérogénéité peut être remarquée sur la cartographie des cacaoyers (Figure 2.3f) où l'on remarque des différences de densités locales à plusieurs zones de la parcelle..

—— Obs    - - - - - theo (CSR)    - - - - - IC à 95% de CSR



**Figure 2.8.** Fonctions  $L(r)$  pour la sous population des agrumes de la parcelle de Bokito à l'intervalle de confiance (IC) 95% de l'hypothèse d'une répartition complètement aléatoire des points du semis (CSR).

## 2.3 Discussions

### 2.3.1 Représentation graphique des sous-populations

La représentation graphique des différentes sous-populations de plantes pérennes de la parcelle agroforestière de Bokito permet de confirmer la diversité et la complexité de ce type de système (Laird et al, 2007 ; Sonwa et al 2007). Dans cette parcelle, en dehors des cultures vivrières (arachides, maïs...) qui ne sont pas prises en considération dans cette étude, il a été recensé une vingtaine d'espèces de plantes pérennes. En fonction des espèces, de la taille et de la position des arbres les uns par rapport aux autres, plusieurs interactions de nature et d'intensité différentes peuvent être recensées (Rao *et al*, 1998 ; Schroth, 1999). L'une de ces interactions est l'action des maladies et ravageurs. Le risque de développement d'une épidémie peut augmenter ou diminuer en fonction de l'abondance et de la promiscuité de divers hôtes d'un même agent pathogène sur le site. L'arrangement spatial des espèces est donc important pour freiner l'évolution des maladies et ravageurs dans un système agroforestier (Schroth, *et al*, 2000). En ce qui concerne la phaeoramulariose, on ne connaît pas encore d'hôte alternatif pour son agent pathogène (Yesuf, 2002). Dans la parcelle agroforestière de Bokito, seuls les agrumes peuvent être attaqués par ce champignon. On suppose donc que les autres familles d'arbres présentes dans la parcelle peuvent constituer des obstacles à l'évolution de cette maladie.

S'agissant de la parcelle de Kumba (verger), l'illustration montre des arbres placés à distance régulière les uns des autres. On note cependant des espaces vides laissés par des plants manquants. La composition des espèces nous montre que les orangers sont l'espèce dominante. Sachant qu'il s'agit d'une espèce sensible, on peut supposer que l'abondance de cette espèce peut contribuer à une dissémination rapide de la maladie.

### 2.3.2 Analyse de la structure de chaque sous-population

L'analyse de la structure spatiale des différentes sous-populations de plantes pérennes qui composent la parcelle agroforestière de Bokito révèle dans l'ensemble des sous-populations fortement agrégées. Des différences sont cependant relevées au sein de chaque sous-population. Les agrégats sont distribués de façon homogène pour les fruitiers, les palmiers et les agrumes. Ces agrégats de différentes tailles sont répartis dans toute la parcelle. En ce qui concerne les cacaoyers et les forestiers, les résultats montrent une agrégation hétérogène. Cette hétérogénéité s'explique en ce qui concerne les cacaoyers par le fait que la mise en place des plants est progressive dans cette parcelle. Certaines portions de la parcelle (lisières) présentent des fortes densités. Ces densités sont comparables à celles recommandées pour cette culture. En effet, les distances de plantations qui sont utilisées dans les cacaoyères sont de 3 m x 3 m ou 3 m x 2.5 m (Ofori-Frimpong, et al 2010). A d'autres portions de la parcelle, on retrouve des densités plus faibles. S'agissant des forestiers, aucun de ces arbres n'est planté par le producteur. Ce sont des arbres issus de la régénération naturelle. En fonction de ses stratégies, le producteur décide d'en abattre certains lors de la mise en place de la parcelle. Leur distribution peut donc être hétérogène.

Les résultats de l'analyse de la structure spatiale d'une parcelle agroforestière nous amènent à penser que chaque sous-population forme des agrégats de taille plus ou moins grande. Les agrégats de chaque sous-population sont séparés les uns des autres par les agrégats des autres

sous-populations. Un agrégat d'agrumes peut être entouré par exemple d'agrégats de cacaoyers, d'autres fruitiers ou de palmiers et bananiers. Ce constat est effectué lorsqu'on observe la figure 2.4. Elle présente une mixité d'agrégats des différentes sous-populations. On constate également que les agrégats des cacaoyers sont de grandes tailles et c'est l'espèce la plus nombreuse.

Nous n'avons pas procédé à l'analyse de la structure spatiale du verger de Kumba car la cartographie de cette parcelle met déjà en évidence une structure régulière et homogène. Les seuls éléments de variations dans la parcelle sont apportés par la différence des espèces présentes et par les vides laissés par les arbres manquants.

Sachant que les conidies de *P. angolensis* sont dispersés par le vent et la pluie (Kuate et al, 1994a ; Seif & Hillocks, 1996) et ne connaissant pas encore d'hôte alternatif à cet agent pathogène, nous pouvons émettre l'hypothèse que la dissémination de la maladie serait plus aisée dans un verger avec une structure spatiale semblable à celle de Kumba que dans une parcelle agroforestière comme celle de Bokito.

Cette étude met également en évidence la difficulté de comparaison des données épidémiologiques issues d'une parcelle agroforestière à celles issues d'un verger. La diversité observée dans la parcelle agroforestière peut engendrer plusieurs interactions qui ne seront pas retrouvées dans les vergers. Cependant, ces interactions peuvent avoir une influence sur le développement de la maladie. A titre d'exemple, le rôle de brise-vent joué par les arbres des différentes sous-population entourant les agrumes. On peut aussi citer le rôle d'arbres d'ombrage joué par certains fruitiers ou forestiers ayant des tailles et des canopées importantes. L'effet de l'ombrage sur le développement de la maladie fera d'ailleurs l'objet d'un des chapitres de cette thèse.

### **2.3.3 Limites de la méthode**

La parcelle de Bokito, de par sa forme, n'était pas la parcelle idéale pour mener une analyse de structure spatiale. En effet, le choix de cette parcelle s'est fait d'abord pour la réalisation des essais dans un système agroforestier. L'idée de l'analyse spatiale a été élaborée après le choix de la parcelle. Le problème d'hétérogénéité auquel nous avons fait face a certes été corrigé par le découpage de triangles pour les fruitiers, les palmiers et les agrumes, mais cette méthode entraîne des corrections importantes des effets de bords. La forme de la parcelle obtenue ne nous a donc pas permis de faire une interprétation fiable au-delà d'une certaine distance (40m). Cependant, nous avons pu à travers ces analyses rendre compte des différences structurales dans deux types de parcelle, l'une plus homogène et régulière et l'autre hétérogène et complexe, présentant une structure sous forme d'agrégats.

Pour valider nos hypothèses, le choix de la parcelle est important. Il serait souhaitable de choisir des parcelles avec des formes moins complexes, ou de procéder au découpage de surfaces rectangulaires ou carrées à l'intérieur des parcelles afin d'éviter les effets de bords, selon les exemples effectués pour des massifs forestiers (Ngo Bieng *et al*, 2011).

Cette perspective peut d'ailleurs se réaliser dans le cadre des dispositifs récemment installés dans le cadre d'une thèse sur la structure spatiale des systèmes agroforestiers au Cameroun.





### ***Chapitre 3 :***

#### ***Identification des facteurs associés au développement de la phaeoramulariose dans les zones humides du Cameroun***



## **Chapitre 3 : Identification des facteurs associés au développement de la phaeoramulariose dans les zones humides du Cameroun**

### **Présentation de l'étude**

Les agrumes sont produits au Cameroun dans plusieurs bassins de production situés dans les cinq zones agroécologiques que compte le pays. La phaeoramulariose des agrumes a été observée uniquement dans les zones humides qui sont également les plus productives. L'incidence de cette maladie est variable d'un bassin de production à l'autre, causant différents degrés de pertes dans ces régions. Cette maladie se révèle ainsi comme une des plus grandes contraintes de production dans ces zones.

La présente étude est effectuée dans l'objectif d'identifier les facteurs biotiques et abiotiques qui déterminent le niveau épidémiologique de la phaeoramulariose dans les différents bassins de productions d'agrumes des zones humides du Cameroun. Elle s'intéresse à un grand nombre de facteurs (climatiques, physiques, agronomiques). Le système de culture est particulier, les agrumes sont généralement plantés en association avec d'autres cultures qui peuvent être d'autres fruitiers, d'autres plantes pérennes (cacaoyers, caféiers) ou des cultures annuelles. Parfois il s'agit d'arbres isolés autour des maisons d'habitation. Dans la majorité des bassins de production il est difficile de rencontrer des parcelles homogènes d'agrumes. Généralement, une seule espèce d'agrumes n'est pas plantée dans la parcelle, mais il s'agit d'un mélange de 2, 3 ou plusieurs espèces. La zone d'étude est très grande, car il faut appréhender la diversité des situations dans les zones de production.

Une enquête descriptive a été conduite dans 39 sites appartenant à 13 bassins de productions (3 sites par bassin) dans les 3 zones agroécologiques :

- La zone des hauts plateaux de l'Ouest Cameroun (latitude 4°54' à 6°36' N, longitude 9°18' à 11°24' E, altitude: 1240-1800 m au-dessus du niveau de la mer asl). Il s'agit d'une zone de montagnes, avec une température moyenne annuelle de 19°C. La pluviométrie est de type monomodal avec 1500 à 2500 mm/an en moyenne. Le bassin de production de Jakiri a été retenu dans cette zone.
- La zone de forêt humide à pluviométrie monomodale (latitude 2°6' à 6°12' N, longitude 8°48' à 10°30' E, altitude: 200- 800 m asl). C'est une zone très humide et chaude, avec des températures moyennes annuelles de 22 à 29°C et une humidité relative de 85-95%. La pluviométrie moyenne annuelle va de 2500 à 4000 mm voire 11000 mm dans certaines localités. Sept bassins de production (Edéa, Pouma, Idenau Njombé, Muyuka, Kumba, Ekona) ont été choisis dans la zone.
- La zone de forêt humide (latitude 2°6' à 4°54'/5°48' N, longitude 10°30' à 16°12' E, altitude: 500-1000 m asl), avec une pluviométrie bimodale. Le climat est chaud et humide avec des températures de l'ordre de 25°C et une humidité relative moyenne de 75%. Cinq bassins de production (Boumnyebel, Mbangassina, Bokito, Obala, Okola) ont été retenus dans la zone.

Les données ont été collectées sur 1512 arbres en 2005 et 1904 arbres en 2006. Les observations ont été faites aux mois de juin et juillet, période pendant laquelle les arbres

portent des fruits. Le choix des arbres se faisait de manière à avoir une représentation de la diversité des situations culturelles et des espèces de chaque site.

Chaque arbre a été décrit (espèce, âge, état phénologique, type d'entretien reçu). Les paramètres environnementaux étaient aussi notés : altitude, type de sol, végétation, système de production.... Sur chaque arbre, la sévérité de la phaeoramulariose a été notée sur la base d'une échelle variant de 0 à 3. Dans cette échelle, 0 représentait les situations dans lesquelles aucun symptôme n'était observé sur feuilles et fruits et 3 celles où plus de 50% de la surface totale des feuilles ou des fruits était attaquée. Les données climatiques des 20 dernières années des stations météorologiques les plus proches des sites ont été collectées auprès de la Direction nationale de la météorologie.

L'analyse des variances a permis de faire la comparaison des différents bassins de production et, au sein de chaque bassin, les différents sites ont été comparés par rapport à la sévérité de la maladie. Le test de Student-Newman-Keuls au seuil de probabilité 5% a été utilisé à chaque fois pour la séparation des différentes moyennes. Une classification ascendante hiérarchique (*average distance between cluster analysis*) a été effectuée pour regrouper les différents bassins par rapport à la sévérité de la maladie. Pour déterminer les facteurs les plus importants affectant cette sévérité, dans la zone d'étude, une analyse de régression logistique a été effectuée. Cette analyse a été complétée par l'analyse de segmentation CART (Classification and Regression Trees) qui met en évidence les relations entre les principaux facteurs (physiques, biologiques, techniques) et les niveaux d'attaque de la maladie.

L'évaluation de la maladie dans la zone d'étude a montré que la phaeoramulariose est présente dans tous les sites. En outre, dans chaque bassin de production, on note une variabilité de niveaux de sévérité de la maladie. Des différences significatives ont été mises en évidence dans les 3 sites d'un même bassin. Seuls les bassins de Boumnyebel et Mbangassina ont présenté des niveaux de sévérité identiques entre les sites. Une variabilité a également été constatée entre les différents facteurs biotiques (espèces végétales) et abiotiques (altitude, climat, types de sol, pratiques culturelles).

L'analyse de régression logistique a permis de retenir l'altitude, l'espèce d'agrumes, le type de sol et le type de végétation comme les facteurs les plus importants associés au développement de la maladie. L'analyse de segmentation CART a confirmé l'importance de l'altitude et de l'espèce d'agrumes. Elle a également révélé des interactions entre ces principaux facteurs et la température moyenne, la pluviométrie, le type d'entretien des arbres. Ces interactions sont surtout mises en évidence dans les sites situés en altitude moyenne. En haute altitude (>1000m) ou en très basse altitude (<200m), c'est l'influence de l'altitude qui est mise en exergue. La sévérité de la maladie est élevée en haute altitude et faible en basse altitude. En altitude moyenne (350-600 m), la sévérité de la maladie est très variable. Elle est faible dans certains sites et élevée dans les autres. La classification ascendante hiérarchique des bassins de production a permis de former 5 groupes de bassins en fonction de la sévérité de la maladie. Nous avons un groupe formé par les bassins de basse altitude, un groupe formé par le bassin de haute altitude et 3 groupes formés par les bassins de moyenne altitude.

Les résultats de cette enquête nous ont permis de retenir l'altitude, l'espèce d'agrumes et le type de sol comme principaux facteurs associés au développement de la phaeoramulariose d'où l'article ci-dessous intitulé « **Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of Phaeoramularia leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon** ».

***Article: Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of Phaeoramularia leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon***

**NDO, E. G. D., BELLA-MANGA, F., NDINDENG, S. A, NDOUMBE-NKENG, M., FONTEM, A. D., & CILAS,C. (2010).** Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of Phaeoramularia leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon. European Journal of Plant Pathology (2010)128: 385-397.

## Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus in the humid zones of Cameroon

Eunice Golda Danièle Ndo · Faustin Bella-Manga · Sali Atanga Ndindeng · Michel Ndoumbe-Nkeng · Ajong Dominic Fontem · Christian Cilas

Accepted: 7 July 2010 / Published online: 28 July 2010  
© KNPV 2010

**Abstract** In Cameroon and most countries of tropical Africa where *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus is reported, a total yield loss of 50–100% is common. For effective control of this disease, it is imperative to understand how it originates, and which factors contribute to its development. To this end, the environmental and biological characteristics of each tree from 39 sites located in 13 citrus production basins in the humid zones of Cameroon were collected by means of a survey. Information was collected by interviewing heads of households, and by visual inspection of trees and their environment. The independent variable was severity of the disease while the dependent variables were environmental and biological characteristics. Climatic characteristics varied from one

basin to another. The 13 citrus production basins were regrouped in five categories based on disease severity. Altitude, tree species and soil type were the main factors influencing the disease severity. Thus the higher is the altitude, the more important is the disease severity. Also, disease severity increased with increasing number of grape fruit, orange and pummelo trees. However, disease severity was lower on trees growing on volcanic soils as compared with the other soil types. Further analysis of these factors could lead to the development of a risk assessment model for *Phaeoramularia* leaf and fruit spot of citrus.

**Keywords** Citrus · Epidemiology · *Phaeoramularia angolensis* · Risk factors

E. G. D. Ndo · F. Bella-Manga · S. A. Ndindeng ·  
M. Ndoumbe-Nkeng  
Centre Régional de Recherche Agricole de Nkolbisson,  
IRAD,  
PO Box 2067 or 2123, Yaoundé, Cameroon

E. G. D. Ndo  
e-mail: iradpnrva@yahoo.com  
URL: [www.irad-cameroon.org](http://www.irad-cameroon.org)

F. Bella-Manga  
e-mail: iradpnrva@yahoo.com  
URL: [www.irad-cameroon.org](http://www.irad-cameroon.org)

S. A. Ndindeng  
e-mail: iradpnrva@yahoo.com  
URL: [www.irad-cameroon.org](http://www.irad-cameroon.org)

M. Ndoumbe-Nkeng  
e-mail: iradpnrva@yahoo.com  
URL: [www.irad-cameroon.org](http://www.irad-cameroon.org)

A. D. Fontem  
Faculty of Agronomy and Agricultural Sciences,  
Department of Plant Protection, University of Dschang,  
PO Box 208 Dschang, Cameroon  
e-mail: dfontem@yahoo.com

C. Cilas (✉)  
CIRAD, UPR Maîtrise des Bioagresseurs de pérennes,  
Avenue Agropolis, TA31/02 34398,  
Montpellier Cedex 5, France  
e-mail: christian.cilas@cirad.fr

## Introduction

In Cameroon, citrus plays an important role as a source of income for small-scale farmers, a nutritional requirement for the population and as forest regeneration trees (Kuate et al. 2006). Citrus is grown in areas generally referred to as “citrus production basins” with characteristics that favour their growth. These production basins are heterogeneous in terms of the citrus population, and biotic and abiotic characteristics of the environment. In many of them, citrus productivity is hindered by *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease (PLFSD). This disease caused by the fungus, *Phaeoramularia angolensis* (Carvalho & Mendes) Kirk, is a major limiting factor to citrus production in some 20 African countries and in the Yemen (Kirk 1986; Kuate 1998). In areas where the disease is reported, a total yield loss of 50–100% is common on susceptible varieties (Kuate et al. 1994). Citrus production is in quarantine in these countries. Because of traditional trade of plant material and the wind-borne dispersal of the fungal spores, this disease constitutes a potential threat (Seif and Hillocks 1993) for Brazil, Mediterranean countries, China, United States of America and other countries which furnish more than 70% of the citrus production.

PLFSD seriously affects leaves and fruits of most citrus species and their relatives, causing several spots and lesions of varying sizes (Brun 1972; Kuate et al. 1994). The susceptibility to *P. angolensis* varies within citrus species and cultivars. Among citrus species grown in Cameroon, grape fruits (*Citrus paradisi* Macf.), Tangerines (*C. reticulata* Blanco) and oranges (*C. sinensis* (L.) Osbeck) are very susceptible while lemons (*C. limon* (L.) Burm. F.) and Pummelo (*C. grandis* (L.) Osbeck), are less susceptible (Bella-Manga et al. 1999). Studies conducted in Cameroon to assess the incidence of the disease at different seasons in the humid forest zone and in the highlands (Kuate and Fouré 1988; Kuate et al. 1994, 1997) revealed that rainy seasons are conducive for disease development. Other studies have shown that leaf and fruit spot disease incidence increases with altitude and with cooler and more humid climatic conditions (Kuate et al. 2002). Furthermore, a series of fungicides have been screened and recommended for the control of PLFSD (Seif and Hillocks 1999; Diallo 2003; Kuate 2003;

Yesuf 2007). However, the ‘stereotyped’ application rate makes treatment very expensive for farmers in developing countries and also raises environmental concerns that may result due to pollution. Taking into consideration the above constraints, it has become necessary to implement an integrated management approach to sustainably control this disease. Such an approach should take into account the fact that in these areas, citrus is grown in association with other perennial or annual crops. As a prelude, a better understanding of the conditions that favour the development of PLFSD in such a setting is imperative. This study was undertaken to determine the relationship between climatic (temperature, relative humidity, rainfall), environmental (altitude, soil type, cropping practices) and biological (variety, plant age) factors and PLFSD severity.

## Materials and methods

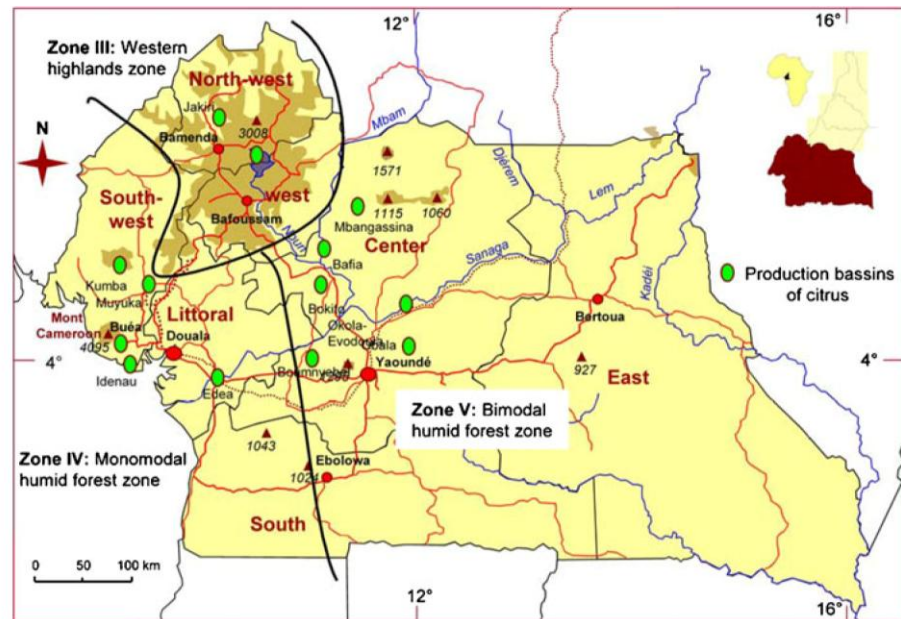
### Biophysical characterization of the sites

The study was conducted in three agro-ecological zones stretching from the northern limit of Cameroon’s forest zone to the border with Equatorial Guinea and Gabon (Ambassa-Kiki 2000) (Fig. 1). The Western Highlands Zone (latitude 4°54′ to 6°36′ N, longitude 9°18′ to 11°24′ E, altitude: 1,240–1,800 m asl) encompasses the North–West and West regions. The only production basin of citrus here, Jakiri, is found in the North–West region. The zone enjoys a humid tropical climate (“Mountainous” type) with low mean temperatures (19°C) and abundant rains (1,500–2,500 mm) that occur in a monomodal configuration. The soils are loamy to clayey in texture.

The Monomodal Humid Forest Zone (latitude 2°6′ to 6°12′ N, longitude 8°48′ to 10°30′ E, altitude: 200–800 m asl, excluding Mount Cameroon at 4,095 m) includes the South–West region with four productions basins (Kumba, Muyuka, Ekona and Idenau), and the Littoral region with three production basins (Pouma, Njombé and Edéa). It enjoys a variant of the equatorial climate which is very humid and hot. The mean annual temperature ranges from 22°C to 29°C, and the relative humidity is as high as 85–90%. Rains are heavy (average: 2,500–4,000 mm/year, excluding Debundscha with 11,000 mm) with a monomodal



**Fig. 1** Citrus production basins in three contrasting humid agro ecological zones of Cameroon



pattern. The soils are sandy to sandy clay or clayey in texture.

The Bimodal Humid Forest Zone (latitude 2°6' to 4°54'/5°48' N, longitude 10°30' to 16°12' E, altitude: 500–1,000 m asl) comprises the Centre, East and South regions. But only the Centre region was involved with the study with five production basins i.e.: Boumnyebel, Mbangassina, Bokito, Obala and Okola. This zone has a sub-equatorial climate, hot and humid. The mean temperature is 25°C and the relative humidity averages 75%. The average annual rainfall ranges from 1,300 mm and 2,500 mm and is of bimodal pattern. The soils are sandy loam, sandy clay loam or clay in texture.

#### Field study

In this study carried out in 2005 and 2006, 13 production basins (cf. preceding paragraph) were selected based on differences observed in their biophysical characteristics, the composition of the citrus population, or the cropping practices in use, after cluster analysis of these preliminary data. However, due to the difficult access to some parts of the Western Highlands Zone, only one production basin could be selected while 7 and 5 were chosen in the Monomodal and Bimodal Humid Forest Zones, respectively. Within each production basin, three sites

were selected and citrus farms that represented the diversity of the site were sampled.

A survey was conducted off-season (June–July) in 2005 and 2006. In 2005, 38 sites were sampled and observations made on 1,512 trees belonging to 126 households. In 2006, the same sites were sampled again, plus an additional site from Bokito production basin, and observations made on 1,904 trees belonging to 206 households. The parameters evaluated whenever possible were climatic (temperature, relative humidity, rainfall), environmental (altitude, soil type, farming practices) and biological (variety, plant age, etc.) factors. As regards the climate, weather data covering 20 years were collected from the Department of National Meteorology in Douala, Cameroon. In general, sites belonging to the same production basin or basins located in the same agro-ecological zone shared the same climatic data because of the prevailing situation of the meteorological network. The other kinds of data were obtained during interviews with the heads of households and by visual inspection of the trees and their environment. This concerns mainly the surroundings of the citrus farm (forest, savannah), altitude (with six altitude classes defined based on their frequency during the survey: 1–200 m, 201–400 m, 401–600 m, 601–800 m, 1,201–1,400 m, and 1,601–1,800 m), tree localization (tree with companion crops such as food crops, coffee or cocoa



**Table 1** List of variable describing citrus trees and their environment

Parameter	Variable	Modality
Climate	Annual rainfall	mm
	Relative humidity	%
	Temperature	°C
Location	Altitude	10–1,684 m asl
	Vegetation	1: Forest
		2: Savannah
		3: Galery forest
	Soil texture or stoniness	1: Clay
		2: Gravelly soil
		3: Sand
		4: Clayish
		5: Sandy clay
		6: Clayish sand
		7: Dark volcanic soil
		8: Brown volcanic soil
		9: Brown clay
	Farming system (FS)	1: Tree-dominated home garden in front of the house
		2: Tree-dominated home garden behind the house
		3: Citrus orchard
		4: Associated fruits orchard
		5: Citrus intercropped in cocoa farm
		6: Citrus intercropped in coffee farm
		7: Citrus intercropped with food crop
		8: Citrus in a fallow
		9: Other situations
	Trees situation	1: Under shade
		2: Semi shade situation
		3: Under direct sunlight
	Nature of water source around the tree	1: Stream
		2: River
		3: Swamp
		4: Ocean
Tree characteristic	Species	1: Orange tree
		2: Tangerine
		3: Grape fruit
		4: Pummelo
		5: Lemon
	Variety	29 varieties
	Age	1: < 10 years
		2 :10–25 years
		3: >25 years
	Type	1: Sow plant
		2: Graft
		3: Sucker

**Table 1** (continued)

Parameter	Variable	Modality
Management pattern	Chemical application	1: Fungicide 2: Insecticide 3: No chemical application 4: Fungicide and insecticide mixture
Phenological state	Presence or absence of leaves /fruits	1: Presence 2: Absence
	Stages of leaves/fruits	1: Young leaves/fruits; 2: Matured leaves/fruits
Severity	Severity on leaves or fruits (SPLSD/SPFSD)	0: Absence of disease symptoms 1: Percent of surface of organ with disease symptoms <25% 2: 25% > Percent of surface of organ disease symptoms <50% 3: Percent of surface of organ disease symptoms >50%

trees, in orchards, under a canopy or exposed to direct sunlight, etc.), soil texture (cf. above), data on crop management practices (generally supply by the farmers), species, variety (when it was possible) and age of trees, tree type (grafted, seed derived...), insecticide or fungicide spraying, presence of a source of water (could be noticed by the observer), location of trees (under a canopy or in full sunlight). The phenological state of trees was also noticed (presence of leaves and fruits and their stages). Epidemiological data were collected by noting the severity of disease on a scale varying from 0 to 3 where 0 represented no disease symptoms on leaves or fruits, and 3 represents more than 50% of the surface of the organs considered (fruits or leaves) covered by the disease symptoms. The overall parameters and variables evaluated are summarized in Table 1.

#### Statistical analysis

An analysis of variance was performed to compare the different production basins, and within each basin to compare the different sites where epidemiological data (severity) were collected. Treatment means were compared using the Student-Newman-Keuls test at the 5% level of probability. The analysis was done with the GLM (General Linear Model) procedure of the SAS (Statistical Analysis System) software, version 8.0.

Based on PLFSD severity, the 13 citrus production basins were regrouped in categories by average

distance between clusters. Agronomic, physiological, and environmental data collected from the survey were evaluated by stepwise logistic regression analysis using the SAS (Statistical Analysis System) software, version 8.0.

To segment the database and predict risk factors for the development of PLFSD, the Classification and Regression Trees (CART) analysis method was used (Breiman et al. 1984). As the response is a quantitative variable, it is a non parametric regression method which allowed explaining a dependent variable Y as a function of several quantitative or qualitative predictors (Nakache et al. 1996). The results obtained with these methods are presented in trees (Guyot et al. 2010). It consists of dividing a set of observations into two groups, obtained by grouping the modalities of an explanatory variable into two modalities, such that the two resulting groups are the most different with respect to the variable to be explained (in this case disease severity on leaves or fruits). The most explanatory variable is the one that separates the initial population into two sub-populations, which themselves can be subsequently divided according to the same principle by the same variable or other explanatory variables (Avelino et al. 2004). The segmentation therefore orders variables according to their discriminatory power. The quality of each division is accessed by applying the Student t test on the means obtained. Each segment of the tree which represents a sub-population is a node of the tree. In each node are the mean, the standard

**Table 2** *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease (PLFSD) severity on leaves and fruits between 2005 and 2006 in different sites of citrus production basins in humid zones of Cameroon

Citrus production basin	Site (n 2005–n 2006)	Mean PLFSD±Sd severity on leaves		Mean PLFSD±Sd severity on fruits		Mean altitude
		2005	2006	2005	2006	
Boumnyebel	Makaï (43–23)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.9±0.9 <sup>a</sup>	0.5±0.9 <sup>a</sup>	376
	Minse, Maloung (16–34)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.2 <sup>a</sup>	1.2±1.1 <sup>a</sup>	0.3±0.6 <sup>a</sup>	376
	NkonMadog (16–46)	0.1±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.8±0.9 <sup>a</sup>	0.8±1.0 <sup>a</sup>	376
Mbangassina	Mbangassina (34–50)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.1±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.4 <sup>a</sup>	0.3±0.4 <sup>a</sup>	450
	Goura (28–40)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.3±0.5 <sup>a</sup>	0.3±0.5 <sup>a</sup>	440
	Etam Nyat (43–56)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.1±0.4 <sup>a</sup>	0.4±0.6 <sup>a</sup>	0.4±0.6 <sup>a</sup>	480
Bokito	Beni (75–13)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.5±0.5 <sup>a</sup>	0.5±0.7 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>b</sup>	407
	Ndomdjengué (92–116)	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>b</sup>	0.8±0.8 <sup>a</sup>	0.6±0.6 <sup>a</sup>	450
	Ombessa (0–57)	–	0.1±0.3 <sup>b</sup>	–	0.3±0.5 <sup>b</sup>	571
Obala	Nkolmelen (55–52)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.7±0.5 <sup>a</sup>	0.4±0.6 <sup>b</sup>	559
	Nkoltomo, Efok (63–51)	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.4±0.7 <sup>b</sup>	0.3±0.5 <sup>b</sup>	538
	Batschenga (62–56)	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.5±0.7 <sup>ab</sup>	0.7±0.6 <sup>a</sup>	516
Okola	Nkol akok (38–21)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.3±0.6 <sup>b</sup>	0.1±0.2 <sup>a</sup>	573
	Nguibassal (70–59)	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.2±0.5 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	474
	Ekekam (63–61)	0.1±0.2 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.6±0.7 <sup>a</sup>	0.2±0.5 <sup>a</sup>	526
Pouma	Seppè (44–34)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>ab</sup>	0.4±0.6 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	56
	Nkonga (39–34)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.3±0.6 <sup>a</sup>	0.3±0.6 <sup>a</sup>	200
	Tjiedikoï (19–34)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.5±0.5 <sup>a</sup>	0.4±0.8 <sup>a</sup>	205
Njombé	Njongo (115–259)	0.1±0.2 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>c</sup>	0.1±0.4 <sup>a</sup>	96
	Loum chantier (49–39)	0.0±0.1 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.4±0.6 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	200
	Nlohé (56–91)	0.1±0.2 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.7±0.7 <sup>a</sup>	0.1±0.5 <sup>a</sup>	289
Edéa	Edéa (16–17)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	91
	Kopongo (38–34)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.6 <sup>a</sup>	0.1±0.2 <sup>a</sup>	91
	Beon (21–53)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>ab</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	91
Jakiri	Jakiri (36–105)	0.3±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>ab</sup>	1.0±0.7 <sup>b</sup>	1.0±0.9 <sup>ab</sup>	1,684
	Kifue (40–15)	0.3±0.5 <sup>a</sup>	0.4±0.5 <sup>a</sup>	1.6±1.0 <sup>a</sup>	1.2±0.9 <sup>a</sup>	1,684
	Waïnamah (37–45)	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>b</sup>	1.1±0.7 <sup>b</sup>	0.7±0.7 <sup>b</sup>	1,684
Kumba	Barombi–kang (36–50)	0.3±0.5 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.4±0.6 <sup>b</sup>	0.6±0.9 <sup>b</sup>	221
	Ekiliwindi (34–33)	0.0±0.9 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>b</sup>	1.4±0.8 <sup>a</sup>	450
	Mabonji–Tantcha (20–18)	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.8±0.9 <sup>a</sup>	0.4±0.8 <sup>b</sup>	xz
Muyuka	Bombé (23–50)	0.1±0.2 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	55
	Banga (38–18)	0.0±0.2 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	44
	Yoké–Malendé (27–34)	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.1±0.2 <sup>a</sup>	33
Ekona	Mautu (22–21)	0.0±0.0 <sup>b</sup>	0.1±0.4 <sup>a</sup>	0.3±0.7 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>b</sup>	200
	Ekona town (35–46)	0.4±0.5 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	0.5±0.8 <sup>b</sup>	0.4±0.8 <sup>b</sup>	380
	Buea(11–36)	0.1±0.3 <sup>b</sup>	0.2±0.4 <sup>a</sup>	1.1±0.8 <sup>a</sup>	0.9±1.1 <sup>a</sup>	1,400
Idenau	Idenau (25–24)	0.3±0.5 <sup>a</sup>	0.4±0.5 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	36
	Bakingili (15–34)	0.3±0.5 <sup>a</sup>	0.2±0.4 <sup>ab</sup>	0.1±0.3 <sup>a</sup>	0.1±0.4 <sup>a</sup>	10
	Limbé (9–44)	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.1±0.3 <sup>b</sup>	0.0±0.0 <sup>a</sup>	0.0±0.2 <sup>a</sup>	17

*Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity was rated using a scale of 0 = no disease to 3 = >50% of organs area covered with lesions. Inside each production basin numbers followed by a different letter are significantly different according to the Student-Newman-Keuls test at  $P < 0.05$ . n2005: number of citrus trees sampled

Sd Standard deviation

deviation, and the number of individuals and the percentage of the total population concerned. This analysis was done using the SPSS Answer Tree version 3.1, 2002.

## Results

### PLFSD severity

The disease was present in all citrus production basins. However, the severity varied with basin and site (Table 2). The highest severities were found in Jakiri (western highlands) and the lowest in Idenau (low altitude humid forest with monomodal rainfall pattern).

In two out of 13 basins (Boumnyebel and Mbangassina) significant differences were not found between the sites (Table 2). In most of these basins, sites and altitude were also different. Based on PLFSD severity, the classification of citrus production basins in 2005 and 2006 yielded five groups (Fig. 2). The first group was composed of Boumnyebel, Kumba and Ekona. In this group nearly all the production basins are situated in the monomodal humid forest zone and altitudes varied between 200 m and 450 m. The second group comprised Bokito and Obala with altitude varying between 407 m and 571 m, situated in the bimodal humid forest zone. The third group composed of Mbangassina, Okola and Pouma, occurred for its majority in the bimodal humid forest zone. The fourth group consisted of Njombé, Edea, Muyuka and Idenau, with very low altitude (10–289 m), and all the basins situated in the monomodal humid forest zone. At last, the fifth group consisted solely of Jakiri situated in the western highlands zone (altitude: 1,684 m asl).

### Categorising variables associated with PLFSD

Altitude, tree species, soil textural class and vegetation were the main variables associated with the severity of PLFSD during the 2-year survey either on leaves or on fruits ( $P < 0.05$ ) (Table 3) and the ranking order did not vary with the year of observation. These three variables were always significantly associated with disease severity, contrary to vegetation in some cases.

The heterogeneity in the disease severity with principal factors can be seen on Figs. 3, 4, 5 and 6.

Disease severity varied with altitude (Fig. 3): the higher the altitude, the more severe the disease was. The highest severity (with  $>25\%$  of organ surface covered with lesions) was found between 1,601 m and 1,800 m asl, while the lowest was found between 1 m and 200 m asl. However between 401 m and 800 m asl, disease severity was almost as important as in class 1,201–1,400. Disease severity on leaves (SPLSD) was always higher than on fruits (SPFSD).

Disease severity was significantly higher on grape fruits than on the other species. Least squares means (LSMean) analysis with tree species on SPLSD and SPLFSD showed that grape fruit LSMean was 2.03, followed by orange (1.64), lemon (1.51), tangerine (1.49), and pummelo (1.47). Although the disease was present on all species, its severity varied among citrus tree species (Fig. 4).

Within the nine soil textural classes found in the humid zones of Cameroon, the highest disease severity either on leaves or on fruits occurred on trees situated on sandy soils (Fig. 5). No significant difference was found in SPLSD and SPLFSD between sandy and sandy clay soils, and between dark clay and brown clay ( $P > 0.05$ ) in one group. However, there was a significant difference between this group and another group of soil textural classes made up of the other five classes ( $P < 0.05$ ).

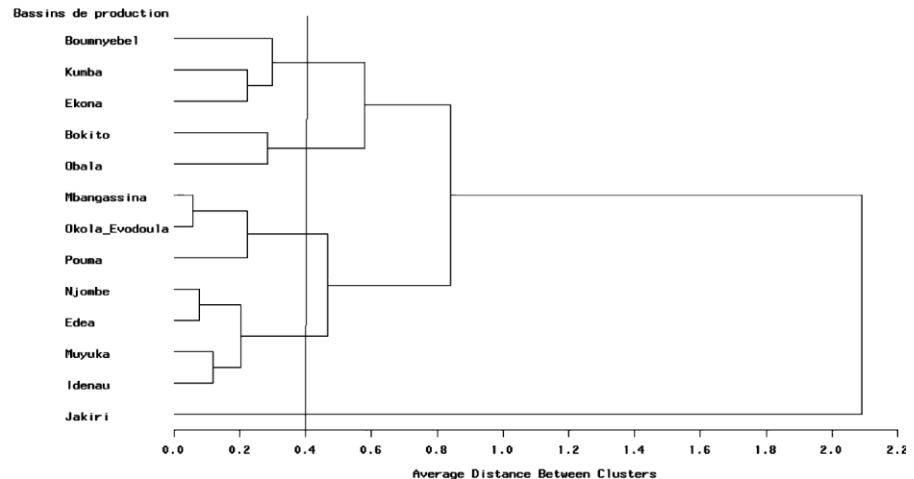
The highest disease severity was found on trees situated in semi-forested land (Fig. 6). With respect to vegetation, PLFSD was present on citrus situated in all the three types of vegetation. However, no significant difference was observed in SPLSD and SPLFSD between the three vegetation types.

### Prediction of risk factors for the development of PLFSD

The previous analyses brought out several variables that are closely linked to disease severity. In the segmentation analysis, the entire variables measured were used to confirm the variables that best explained the disease severity. The segmentation trees obtained with 2005 and 2006 data show that disease severity respectively on leaves and fruits in the two answer trees are mostly explained by altitude (Fig. 7). The higher the altitude, disease severity is more important. Tree species is also a risk factor, and in lower altitudes, disease severity is higher in presence of grape fruit. In presence of other species (orange,



**Fig. 2** Classification of citrus production basins of Cameroon by clustering *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity in 2005 and 2006



pummelo, lemon and tangerine), high disease severity on leaves (a) is noticed on trees treated with fungicide and insecticide mixture. In addition, when trees are treated with fungicide and insecticide mixture, higher temperature ( $>26^{\circ}\text{C}$ ) increases the severity of disease on leaves (a). However, in presence of orange trees, tangerine, lemon and pummelo, disease severity on fruits (b) increases with lower temperature ( $\leq 26^{\circ}\text{C}$ ).

**Table 3** Variables significantly associated with *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus selected from data collected between 2005 and 2006 in the humid zones of Cameroon

Year	Symptoms	Factor	d. f.	F value	Pr > F
2005	Leaves spot	Altitude	1	134.4	<.0001
		Tree species	4	32.4	<.0001
		Soil type	8	10.8	<.0001
		Vegetation type	2	3.0	0.0482
	Fruits spot	Altitude	1	147.1	<.0001
		Tree species	4	39.7	<.0001
		Soil type	8	6.3	<.0001
		Vegetation type	2	8.4	0.0002
2006	Leaves spot	Altitude	1	143.7	<.0001
		Tree species	4	40.2	<.0001
		Soil type	8	2.2	0.0233
		Vegetation type	2	10.4	<.0001
	Fruits spot	Altitude	1	274.4	<.0001
		Tree species	4	57.7	<.0001
		Soil type	8	2.9	0.0037
		Vegetation type	2	8.5	0.0002

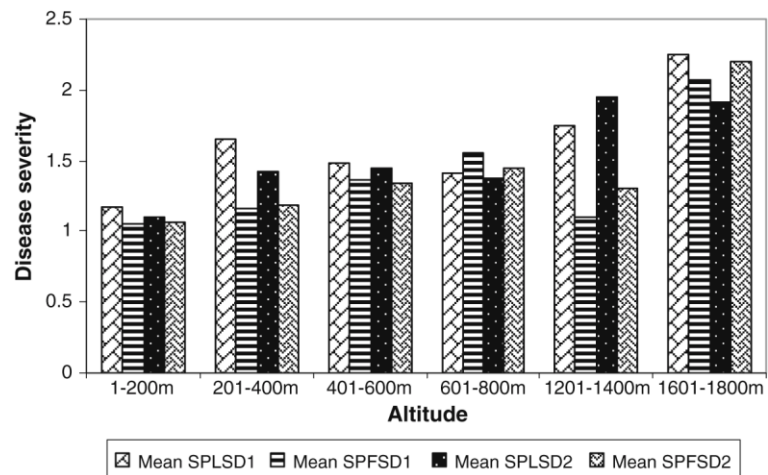
## Discussion

Prediction of risk factors for the development of PLFSD

Our results show that PLFSD epidemics depend mainly on altitude, tree species, soil texture, vegetation, temperature, rainfall and management pattern. This is in line with the finding that the epidemic risk results from regional and local risk factors, the latter including production situation (Avelino et al. 2006). These factors are not independent, for example in Jakiri, there is an abundance of orange trees which are surrounded by semi forested land and the altitude of this zone is high. The relationships between these three factors have an impact on disease severity, the highest disease severity is found in this citrus production basin.

Segmentation trees showed that at higher and lower altitudes, the effect of altitude is dominant whereas at medium altitude, other factors could have an impact on disease severity. To study this impact, it is necessary to do experimentation in such zones and consider all these factors. This work was done in field conditions where the number of trees per species was not the same. Abundance of some tree species was also not even in all the studied zones. This is the case of grape fruit trees very sensitive species, which were abundant in low altitude zones (Pouma, Edea, Muyuka, Ekona, and Idenau) and rare in high and medium altitude zones (Jakiri, Obala, Mbangassina). To quantify the effect of such a factor, it will be better to analyse the same number of trees per species and per citrus production basin.

**Fig. 3** Altitudinal differences in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity on citrus leaves and fruits in 2005 (1) and 2006 (2) in the humid zones of Cameroon



In addition it will be important to include factors such as the genetic background of the pathogen to ensure a uniform host-pathogen system.

Concerning the management pattern of disease, the high severity on leaves noticed on trees treated with fungicide and insecticide mixture can be explained by an inappropriate treatment timing: treatments by farmers are usually done while when leaves and fruits are already attacked and therefore have no impact on disease severity.

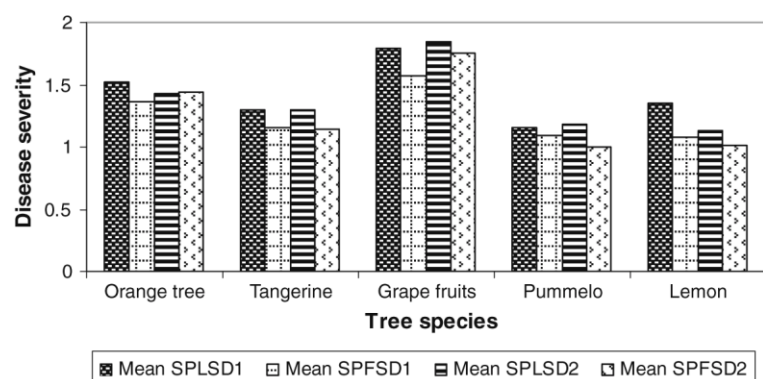
#### Severity of PLFSD

PLFSD is one of the most important diseases limiting the production of citrus in areas where disease is prevalent. Predicting disease severity based on some predetermined factors is critical for managing PLFSD especially in developing countries where a high production cost is unsustainable. In this study, we have demonstrated that altitude, tree species and soil

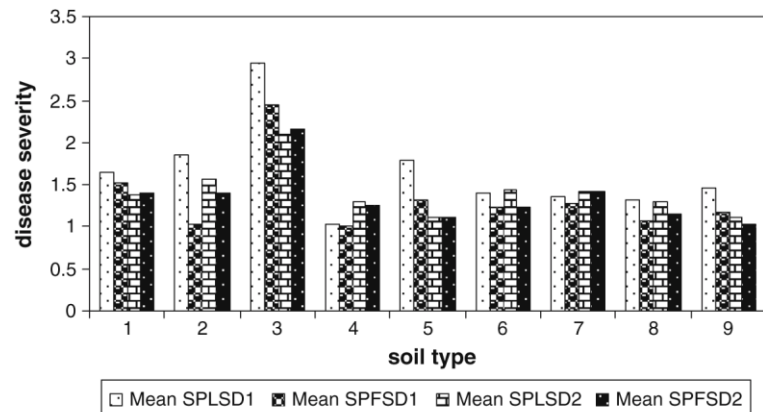
type are the major factors that influence the severity of PLFSD of citrus. In addition, we observed that disease was present where it was not expected, basins with similar characteristics exhibiting very different levels of disease, and that there was more disease on leaves than on fruits. These facts indeed raise questions, for instance which kind of predictive model should be used and on which scale.

Although the disease was present in all the production basins, the severity varied among basins and site, contrary to the previous founding that disease can only be found on susceptible varieties situated on sites above 200 m (Kuate et al. 1994). Differences in severities observed in the different sites of each production basin could be due to the fact that basins were not homogeneous in terms of citrus species present, farming systems, soil type, altitude, vegetation and other ecological factors. Disease severity observed in the 13 production basins was categorized into four categories: very high (Jakiri),

**Fig. 4** Heterogeneity in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity on leaves and fruits of citrus species in 2005 (1) and 2006 (2) in the humid zones of Cameroon



**Fig. 5** Heterogeneity in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity of citrus amongst soil types in the humid zone of Cameroon



high (Boumnyebel, Bokito, Obala, Ekona), middle (Okola, Kumba, Pouma, Mbangassina) and low severity (Idenau, Muyuka, Njombé, Edea). With this classification, we observed that basins could have in common the same altitude, the same soil type, the same species for instance but present very high differences in PLFSD severity. The differences observed showed that other factors not considered in the present study are involved in the development of PLFSD. Severity on leaves is almost always more important than on fruits. This can be due to the lack of fruits at the moment of certain observations. Disease severity either on leaves or on fruits in each citrus production basin developed in the same way in 2005 and in 2006.

#### Factors involved in the development of PLFSD

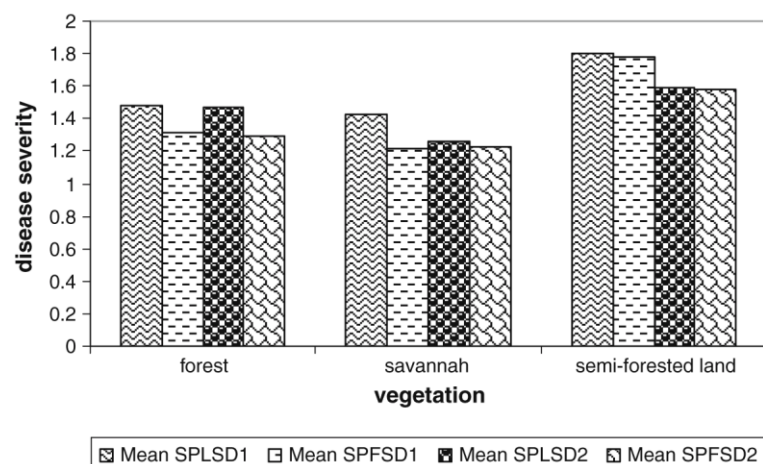
Biotic factors (tree species and varieties, trees age, leaves and fruits stages, vegetation type, production

system) and abiotic factors (altitude, mean temperature, relative humidity, rainfall, soil texture) were recorded during the survey. As with other diseases of perennial crops (Agostini et al. 2003; Avelino et al. 2004; Mouen Bedimo et al. 2007), this study shows that numerous factors of different types affect the development of PLFSD of citrus, illustrating the complexity of *Phaeoramularia angolensis*-citrus pathosystem. Among those factors, altitude, soil texture, tree species and vegetation type are the most important. The effect of these factors on disease severity was the same irrespective of the observation year.

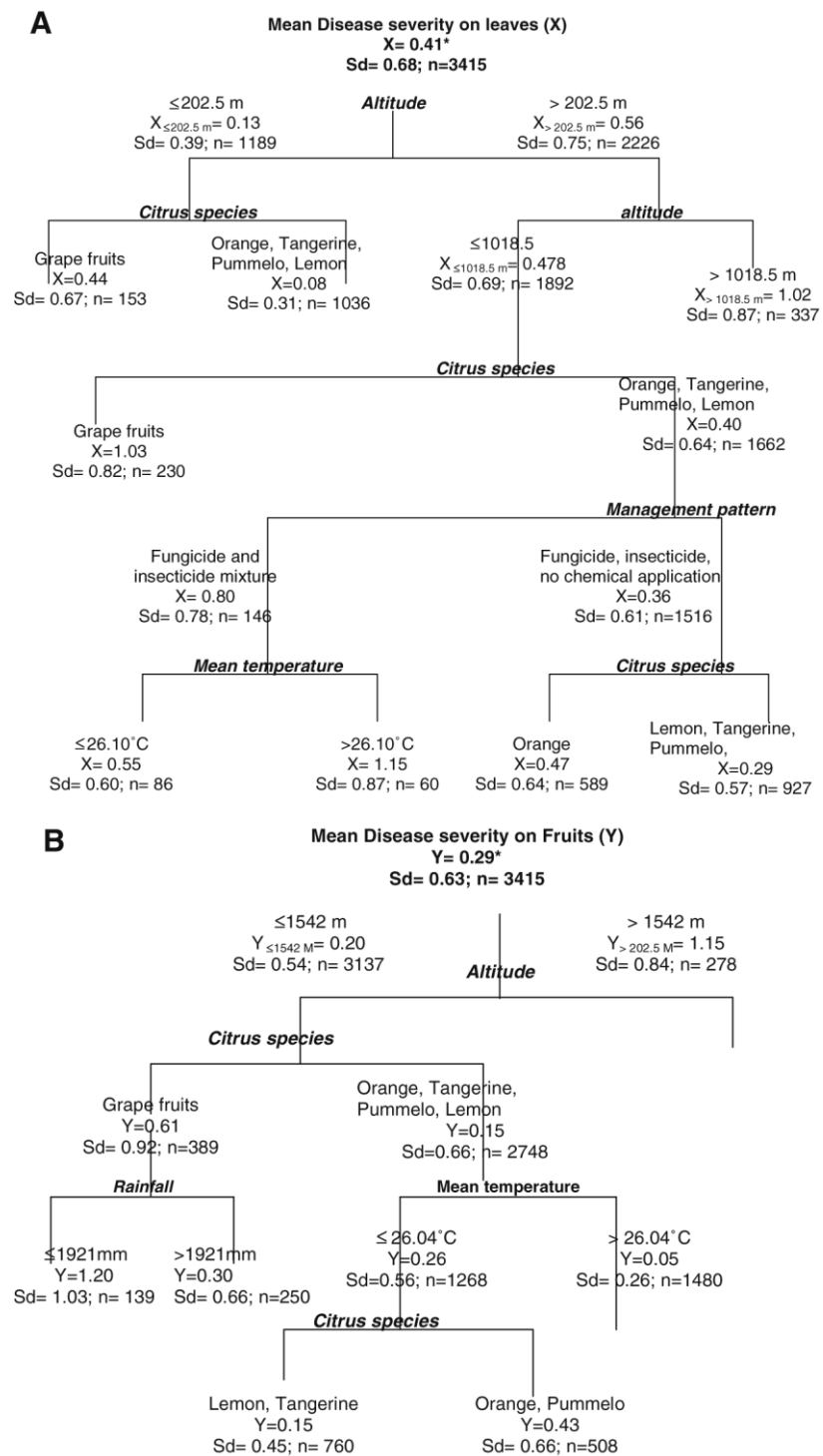
#### Altitude

The highest severities on fruits and leaves were found at higher altitudes (Jakiri situated at 1,684 m asl.) and the lowest at lower altitudes (Idenau situated between 10 m and 36 m asl.). In addition, some differences were found

**Fig. 6** Differences in *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease severity of citrus amongst the major vegetations in the humid zone of Cameroon



**Fig. 7** Risk factors associated with the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease in the humid zone of Cameroon. **A** Altitude, citrus species, citrus variety and tree type as main factors responsible for disease severity on leaves. **B** Altitude, citrus species, rainfall, mean temperature and citrus variety as the main factors responsible for disease severity on fruits



\*Classification of disease severity

0: Absence of disease symptoms

1: Percent of surface of organ with disease symptoms <25%

2: 25% > Percent of surface of organ disease symptoms <50%

3: Percent of surface of organ disease symptoms >50%



between sites situated in the same basin but at different altitudes ( $P < 0.05$ ). This was the case for Ekona where in one of the sites situated at 1,400 m asl., the mean severity index on fruits was 2.1 while in the two other sites situated between 200 m and 380 m asl., the mean severity index on fruits was 1.3. Those results show as in previous studies on PLFSD the importance of altitude in the development of this disease (Kuate 1998). In production basins and sites situated in medium altitude, disease severity presented very significant differences ( $P < 0.05$ ). In some of them the severity was high (Boumnyebel, Bokito and Obala) while in the others it was very low (Mbangassina and Okola). All those basins are situated around 500 m asl.

#### Citrus species

(Bella-Manga et al. 1999) classified species according to their sensibility to PLFSD. In this classification, grape fruit trees (*Citrus paradisi* Macf.) and some tangerines (*C. reticulata* Blanco) were in the very sensitive group, whereas oranges (*C. sinensis* (L.) Osbeck) and other tangerines were in the medium group and lemon (*C. limon* (L. Burm. F.) and pummelo (*C. grandis* (L.) Osbeck) were in the less sensitive group. Results obtained in this study confirm this classification, even though differences observed are not statistically significant. Disease severity observed on grape fruit trees was the highest, followed by severity on orange trees. The number of trees observed was not the same per species and the distribution of species observed was not equitable in all the basins. Orange trees were the most abundant in almost all the production basins. It is known that, the degree of sensitivity of species equally depends on geographical zones (Kuate et al. 1994; Diallo 2001) and probably on the genetic background of the pathogen.

#### Soil texture

Highest disease severity is observed on trees situated on sandy soils followed by sandy clay, dark clay and brown clay soils with no significant differences. Soils with sand and clay are very suitable for the development of citrus (Walali Loudyi et al. 2003). Trees situated on such soils perform very well and so could be threatened by *Phaeoramularia angolensis*. This potential threat to citrus production needs to be confirmed by a more precise analysis of soil composition.

#### Vegetation

Forest, savannah and semi forested land are the three types of vegetation surrounding citrus orchards in the humid zones of Cameroon. Disease severity was higher on trees situated in semi forested land, but differences observed between the three types of vegetation were not statistically significant. Semi forested land are mostly situated on high and medium altitude sites (Jakiri, Bokito). Orange trees are abundant on those sites. All those factors could lead to a higher disease severity in those zones.

This research has shown relationships between *Phaeoramularia* leaves and fruits spot disease severity and altitude, citrus species and varieties, soil texture, vegetation and rainfall. These relationships can be exploited to develop a predictive model for *Phaeoramularia* leaves and fruits spot disease severity. Prediction accuracy, however, could be improved by taking into account experimentation done with risk factors in the different citrus production basins; in addition, the number of trees per species per basin should be equitably chosen to avoid any interdependence and take into account the diversity of the host-pathogen system. Additional years of data collection should improve this survey and contribute to the determination of more robust predictive risk factors.

**Acknowledgements** This work was supported by grants from the Institute of Agricultural Research for Development (IRAD) within the PNRVA/BAD, the PCP Grand Sud Cameroun and the REPARAC projects.

#### References

- Agostini, J. P., Bushong, P. M., & Timmer, L. W. (2003). Greenhouse evaluation of products that induce host resistance for control of scab, melanose, and *Alternaria* brown spot of citrus. *Plant Disease*, 87, 69–74.
- Avelino, J., Willocquet, L., & Savary, S. (2004). Effet of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant pathology*, 53, 541–547.
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordonez, M., & Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological modelling*, 197, 431–447.
- Bella-Manga, Dubois, C., Kuate, J., Mimbimi-Ngbwa, M., & Rey, J. Y. (1999). Sensibilité à *Phaeoramularia angolensis* de divers d'agrumes cultivés en zone forestière humide du Cameroun. *Fruits*, 54, 167–176.

- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth International Group. Belmont: Chapman and Hall.
- Brun, J. (1972). La Cercosporiose des agrumes provoquée par *Cercospora angolensis*. *Fruits*, 27, 539–541.
- Diallo, M. T. S. (2001). Progression de la cercosporiose des agrumes (*Phaeoramularia angolensis*) en Guinée. *Fruits*, 56, 37–43.
- Diallo, M. T. S. (2003). Vers une lutte contre la cercosporiose des agrumes en Guinée. *Fruits*, 58, 329–344.
- Guyot, J., Condina, V., Doaré, F., Cilas, C., & Sache, I. (2010). Segmentation applied to weather-disease relationships in South American leaf blight of the rubber tree. *European Journal of Plant Pathology*, 126(3), 349–362.
- Kirk, P. M. (1986). *Phaeoramularia angolensis*. *Mycopathology*, 94, 177–178.
- Kuate, J. (1998). Cercosporiose des agrumes causée par *Phaeoramularia angolensis*. *Cahiers Agricultures*, 7, 121–129.
- Kuate, J. (2003). La Cercosporiose des Agrumes au Cameroun provoquée par *Phaeoramularia angolensis* : Evaluation de la Lutte Chimique et de la Sensibilité Variétale au Champ comme Méthode de Contrôle. In *Faculté des Sciences Agronomiques* Gembloux.
- Kuate, J., & Fouré, E. (1988). La cercosporiose des agrumes (*Cercospora angolensis*). Contribution à l'étude épidémiologique dans la zone écologique de Dschang (Cameroun). *Fruits*, 43, 559–567.
- Kuate, J., Bella-Manga, Rey, J. Y., & Foure, E. (1994). Symptômes de la cercosporiose des agrumes due à *Phaeoramularia angolensis*. *Fruits*, 49, 31–36.
- Kuate, J., Bella-Manga, Damesse, F., Foure, E., & Rey, J. Y. (1997). Evolution de la cercosporiose à *Phaeoramularia angolensis* sur feuilles d'agrumes en zone forestière humide du Cameroun. *Fruits*, 52, 297–306.
- Kuate, J., Foure, E., Foko, J., Ducelier, D., & Tchio, F. (2002). La phaeoramulariose des agrumes au Cameroun due à *Phaeoramularia angolensis*: expression parasitaire à différentes altitudes. *Fruits*, 57, 207–218.
- Kuate, J., Bella-Manga, Damesse, F., Kouodiekong, L., Ndindeng, S. A., & David, O. (2006). Enquête diagnostic sur les fruitiers dans les exploitations familiales agricoles en zone humide du Cameroun. *Fruits*, 61, 373–387.
- Mouen Bedimo, J. A., Bieysse, D., Njiayoum, I., Deumeni, J. P., Cilas, C., & Nottéghem, J. L. (2007). Effect of cultural practices on the development of Arabica coffee berry disease, caused by *Colletotrichum kahawae*. *European Journal of Plant Pathology*, 119, 391–400.
- Nakache, J. P., Vilain, J., & Fertil, B. (1996). Discrimination et régression par une méthode neuromimétique et par la méthode de segmentation CART: application à différentes données et comparaison des résultats. *Revue de Statistique Appliquée*, 44, 19–40.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1993). *Phaeoramularia* fruit and leaf spot of citrus with special reference to Kenya. *International Journal of Pest Management*, 39, 45–50.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1999). Reaction of some citrus cultivars to *Phaeoramularia* fruit and leaf spot in Kenya. *Fruits*, 54, 323–329.
- Walali Loudyi, D. E. M., Skiredj, A., & Hassan, E. (2003). Fiches techniques: Le bananier, la vigne et les agrumes. In *Transfert des technologies en agriculture*, Institut Agronomique et Vétérinaire HassanII, Rabat.
- Yesuf, M. (2007). Distribution and management of *phaeoramularia* leaf and fruit disease of citrus in Ethiopia. *Fruits*, 62, 99–102.

## ***Chapitre 4 :***

### ***Analyse de l'impact des facteurs environnementaux sur le comportement de différentes variétés d'agrumes face à la phaeoramulariose***



## **Chapitre 4 : Analyse de l'impact des facteurs environnementaux sur le comportement de différentes variétés d'agrumes face à la phaeoramulariose**

### **4.1 Introduction**

L'expression de la maladie est le résultat de l'action de l'environnement, du pouvoir de l'agent pathogène, de la nature de la plante hôte, des interventions des producteurs ainsi que des interactions entre ces différents facteurs (Zadocks et Schein, 1979). Dans le cas de la phaeoramulariose des agrumes, les études ont montré que le niveau de sévérité de la maladie peut être influencé par l'espèce/variété d'agrumes. Bella *et al* en 1999 ont réparti les agrumes en 3 groupes de sensibilité vis-à-vis de la phaeoramulariose (tolérant, peu sensible, très sensible). S'agissant des facteurs environnementaux, il a été démontré que les attaques les plus sévères sont observées pendant la saison des pluies et que la sévérité augmente avec une élévation en altitude (Kuate ,1998 ; Kuate, 2002). L'enquête réalisée dans 13 bassins de production d'agrumes au Cameroun nous a permis d'identifier l'altitude, l'espèce d'agrumes et le type de sol comme principaux facteurs qui influencent le développement de cette maladie (Ndo *et al*, 2010).

Les études réalisées sur l'épidémiologie de la maladie jusqu'alors ne tiennent pas compte des systèmes de production. Les différents essais sont menés dans des vergers purs d'agrumes. Pourtant, les agrumes au Cameroun sont en général mis en place dans des parcelles en association avec d'autres cultures pérennes ou annuelles (Kuate *et al*, 2006). Selon les principes de base de l'épidémiologie, une forte concentration de plantes identiques peut modifier le développement d'une épidémie (Corbaz, 1990). Dans le cas de la phaeoramulariose des agrumes existe-il une différence de sévérité entre les agrumes placés dans des vergers purs d'agrumes (forte concentration de plants identiques) et ceux placés dans des systèmes agroforestiers où les agrumes sont en association avec des cultures vivrières, du cacao, du café et/ou des arbres forestiers ? Il apparaît donc que la connaissance des effets du système de production fait défaut malgré l'importance qu'elle pourrait revêtir. En outre, les travaux effectués jusqu'à présent prennent en considération les facteurs de manière indépendante. Les interactions entre différents facteurs (type de sol, climat, espèce, système de culture) sont minimisées. Dans ces conditions, le poids des facteurs dans l'épidémiologie est difficilement mesurable. En guise d'exemple, le niveau de sévérité de la phaeoramulariose sur lime (espèce tolérante) en haute altitude sera-t-il le même lorsqu'on se trouve en basse ?

Il apparaît donc essentiel, connaissant nos espèces d'agrumes et leur niveau de sensibilité, de caractériser l'environnement dans lequel elles se trouvent, afin de déterminer l'impact des différents facteurs et leurs interactions sur le niveau de la maladie. La présente étude s'appuie sur deux essais multilocaux. Le premier essai est une parcelle d'agrumes identiques mise en place dans des vergers expérimentaux de l'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) sur 4 sites différents. Le second est une comparaison d'espèces/variétés d'agrumes dans des parcelles paysannes, appartenant à deux systèmes de production différents dans 4 autres sites. L'objectif de ce travail est de quantifier l'impact de l'altitude, du type de sol, du climat et du système de production sur le comportement de différentes espèces/variétés d'agrumes vis-à-vis de la phaeoramulariose. Il s'agit donc d'expliquer le degré de sévérité de la maladie sur chacune des espèces d'agrumes en fonction

des facteurs climatiques, édaphiques et du système de culture du site dans lequel elle se trouve.

Cette étude a été conduite dans la partie humide du Cameroun, composée de 3 zones agro-écologiques : la zone des Hauts plateaux de l'Ouest Cameroun, la zone de Forêt humide à pluviométrie monomodale et la zone de Forêt humide à pluviométrie bimodale.

## **4.2 Matériel et méthodes**

### **4.2.1 Choix des sites et parcelles**

Le choix des sites a été orienté de manière à intégrer la variabilité agroécologique des zones de production d'agrumes. Les sites ont été choisis dans les zones III, IV et V (Figure 4.1) qui présentent une grande diversité agroécologique (Ambassa-Kiki, 2000). Ce choix a également été guidé par les résultats de notre enquête (Chapitre 3). En effet, la classification ascendante hiérarchique nous a permis de former 5 groupes de bassins de production en fonction du niveau de sévérité de la phaeoramulariose. Au moins un site a été choisi dans chacun des groupes de bassins. Toutefois, ce choix de sites a également été orienté par la disponibilité des parcelles. Ayant affaire aux cultures pérennes, la création de nouveaux essais aurait nécessité beaucoup de temps, ce d'autant plus que l'observation des fruits ne peut se faire que sur des arbres ayant 3 ans au minimum. L'Institut de Recherche Agricole pour le Développement (IRAD) dispose de 4 parcelles identiques à Foumbot, Nkolbisson, Ekona et Njombé. La présence de ces parcelles a déterminé le choix de ces sites. Le choix des autres sites a été confirmé par la disponibilité des parcelles (en majorité agroforestières).

Cinq sites de moyenne altitude (Nkolbisson, Ekona, Kumba, Bokito et Boumnyebel) ont donc été choisis. En basse altitude, le site de Njombé a été retenu. En haute altitude le choix a porté sur deux sites Foumbot et Jakiri. La figure 4.1 permet de localiser les sites choisis dans chaque zone agroécologique.

Dans la zone des Hauts plateaux de l'Ouest (latitude 4°54' à 6°36' N, longitude 9°18' à 11°24' E, altitude: 1240-1800 m au-dessus du niveau de la mer asl) deux sites ont été choisis, Jakiri et Foumbot. Il s'agit d'une zone de montagnes, avec une température moyenne annuelle de 19°C et une pluviométrie moyenne abondante (1500-2500 mm). La pluviométrie est de type monomodal (une saison sèche de décembre à février et une saison des pluies de mars à novembre).

Dans la zone de forêt humide à pluviométrie monomodale (latitude 2°6' à 6°12' N, longitude 8°48' à 10°30' E, altitude: 200- 800 m asl), les sites de Njombé, Ekona et Kumba ont été choisis. C'est une zone très humide et chaude, avec des températures moyennes annuelles de l'ordre de 22 à 29°C et une humidité relative de 85-95%. La pluviométrie moyenne annuelle va de 2500 à 4000 mm voire 11000 mm dans certaines localités.

Dans la zone de forêt humide à pluviométrie bimodale (latitude 2°6' à 4°54'/5°48' N, longitude 10°30' à 16°12' E, altitude: 500-1000 m asl), on a 2 saisons de pluies (mars-juin et septembre-novembre) et 2 saisons sèches (juillet-août, décembre-février). Le climat est chaud et humide avec des températures de l'ordre de 25°C et une humidité relative de 75% en moyenne. Les sites de Nkolbisson, Bokito et Boumnyebel y ont été sélectionnés.



**Figure 4.1.** Carte de localisation des sites d'essai dans les zones agro écologiques du Cameroun.

#### 4.2.2 Choix des espèces/variétés

Des études antérieures ont montré une différence de sensibilité entre les espèces et variétés d'agrumes face à la *Phaeoramulariose*. Tous les pomelos (en dehors de la variété Oroblanco) sont classés dans le groupe des « très sensibles » avec plus de 70% des feuilles ou fruits malades. Les orangers, quelle que soit la variété, sont classés dans le groupe des « sensibles » avec 30 à 70% des feuilles ou fruits malades. Les citronniers, la lime Tahiti et les pamplemoussiers sont classés dans le groupe des « peu sensibles » avec moins de 30% de feuilles ou fruits atteints. En ce qui concerne les mandariniers, ils sont classés dans tous les

groupes en fonction de la variété. Le mandarinier Madagascar est classé dans le groupe des sensibles, les mandariniers Beauty et Satsuma sont classés dans le groupe des peu sensibles (Seif, 1998 ; Bella *et al*, 1999 ; Kuate, 2003). La présente étude prend en considération ces différences de sensibilité. Le choix a été porté sur les pomélos, les deux variétés présentes dans les sites d'étude et ayant les mêmes niveaux de sensibilité ont été choisies. Il s'agit des variétés Marsh Jabarito et Pink Ruby. Les orangers de plusieurs variétés (Marsh Early, Valencia Late, variétés locales) ont également été choisis. Les mandariniers Satsuma, Beauty et Madagascar ainsi que la lime Tahiti font également partie des variétés choisies. Tout au long de cette étude, nous utilisons le terme variété pour qualifier ces 6 géotypes, tout en sachant que les pomélos et orangers n'appartiennent pas à une seule variété.

#### **4.2.3 Dispositif expérimental/Description des parcelles**

Deux types de parcelles sont concernés par cet essai. Il s'agit, pour le premier type, des parcelles mises en place pour des études sur la phaeoramulariose dans les vergers expérimentaux de l'IRAD selon un plan et un protocole bien établis. Le deuxième type concerne les parcelles mises en place par les producteurs paysans. Leur mise en place obéit à des stratégies paysannes. Ce sont généralement des parcelles d'association de divers espèces de fruitiers, de cacaoyers ou caféiers, d'arbres forestiers et de cultures annuelles. L'introduction des espèces se fait au fil du temps pour des raisons maîtrisées par le producteur.

##### **a- Parcelles des vergers expérimentaux de l'IRAD**

Les parcelles de l'IRAD ont été mises en place en 2006 suivant un même plan (Tableau 4.1). L'installation de ces parcelles s'est faite pour d'autres études sur la phaeoramulariose, notamment celle sur la sensibilité variétale. Cette étude utilise par conséquent un dispositif expérimental déjà existant. Ces parcelles sont situées à Foubot, Njombé, Ekona et Nkolbisson. Chaque parcelle comporte 14 variétés d'agrumes (voir Tableau 4.1). Les plants sont issus de greffage sur *Citrus volkameriana*. Les parcelles sont divisées en 3 blocs avec 2 arbres de chaque variété par bloc. Les distances de plantation des arbres sont de 7 m x 7m. Les blocs sont entourés d'une bordure de Pomélos qui sont très sensible à la phaeoramulariose et qui jouent le rôle de « diffuseur d'inoculum ». Dans le cadre de cette étude, 5 variétés (Mandarinier Beauty, Mandarinier Satsuma, lime Tahiti, Pomélo et Oranger) présentant d'après les précédentes études (Bella *et al*, 1999), des niveaux de sensibilité différents vis-à-vis de la phaeoramulariose faisaient l'objet des observations. Le nombre d'arbres retenus par variété est de 5. Au total 25 arbres par parcelle ont été observés pendant 3 années. Les autres arbres présents dans la parcelle étaient juste soumis à des entretiens réguliers pour le maintien du verger.

Dans la parcelle de Foubot, plusieurs arbres appartenant aux variétés ciblées ont dépéri. Les arbres de la parcelle voisine mise en place en 2002 selon un plan légèrement différent (Kuate, 2003) (Tableau 4.2) ont été observés en remplacement. Toutefois, la parcelle 2002 n'ayant pas de mandarinier Satsuma, ceux de la parcelle 2006 étaient observés. Ainsi le dispositif à Foubot comprend, 5 plants de Mandarinier Satsuma de la parcelle de 2006 et 20 plants des 4 autres variétés (Mandarinier Beauty, Lime Tahiti, Pomélo et Oranger) de la parcelle 2002. L'âge des plants n'étant pas un facteur majeur influençant le développement de la maladie (Ndo *et al*, 2010), cette modification ne devrait pas fondamentalement influencer les résultats.



**Tableau 4.1.** Plan des parcelles d'essai des effets environnementaux sur le niveau de résistance/sensibilité de différents groupes d'agrumes à la phaeoramulariose de 2006.

N° variété	Nom de la Variété	P	P	P	P	P	P	P	P	P	Bloc
1	Mandarinier Beauty	P	7	2	10	9	11	1	13	P	Bloc I
2	Mandarinier Clemantine	P	14	4	8	3	5	12	6	P	
3	Mandarinier Obala	P	13	11	4	9	1	5	8	P	
4	Mandarinier Satsuma St. Jean	P	2	10	3	7	12	14	6	P	
5	Mandarinier Satsuma Owari	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
6	Mandarinier King of Siam	P	2	11	8	10	14	13	7	P	Bloc II
7	Oranger Valencia Late	P	5	3	6	9	12	4	1	P	
8	Oranger Marsh Early	P	7	9	3	13	8	6	2	P	
9	Citronnier Lime Tahiti	P	4	1	10	5	11	14	12	P	
10	Citronnier Meyer	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
11	Citronnier Sainte Theresa	P	9	7	11	4	12	10	3	P	Bloc III
12	Pamplemoussier Pink	P	13	14	2	1	6	5	8	P	
13	Tangor Ortanique	P	9	8	4	6	1	12	13	P	
14	Pomélo	P	5	7	2	14	10	11	3	P	
		P	P	P	P	P	P	P	P	P	

Mise en place : 2006 ; P = pomélo de bord (60) ; 14 variétés et plants par variété (3blocs) écartement = 7x7m

## b- Parcelles paysannes

Elles sont localisées dans 4 sites (Bokito, Boumnyebel, Kumba et Jakiri). Ce sont deux types de parcelles. Le premier type est composé de parcelles agroforestières mises en place sans plan précis, avec des écartements irréguliers entre les plants. Les agrumes sont associés à d'autres fruitiers, des cultures annuelles, des cacaoyers et/ou des caféiers. Dans la plupart de ces parcelles, les arbres sont issus de semis. L'âge ainsi que la variété ne sont pas connus avec exactitude. Il s'agit de 2 parcelles situées à Bokito, 2 parcelles situées à Jakiri et une parcelle située à Boumnyebel. A la différence des 4 premières parcelles qui sont composées d'agrumes de semis, la parcelle de Boumnyebel n'a uniquement que des plants issus d'un greffage sur *Citrus volkameriana*.

Le deuxième type de parcelle est composé d'un verger pur d'agrumes mis en place sur le modèle des vergers expérimentaux de l'IRAD et situé dans le site de Kumba. Les plants âgés de 7 ans, sont issus d'un greffage sur *Poncirus trifoliata*. Les distances de plantation entre les arbres sont de 6 m x 6 m.

Dans chacune des parcelles paysannes, quelques arbres ont été choisis en fonction de la disponibilité et des espèces présentes. Le tableau 4.3 fait un récapitulatif des espèces/variétés et du nombre d'arbres choisis par site et par parcelle pour les observations de cette étude.

**Tableau 4.2.** Plan de la parcelle d'essai des effets environnementaux sur le niveau de résistance/sensibilité de différents groupes d'agrumes à la phaeoramulariose (Foumbot 2002).

	x b1	x b2	x b3	x b4	x b5	x b6	x b7	x b8	x b9	x b10	x b11	x b12	x b13	
	x b14	.7	.3	.11	.8	.10	x b15	.1	.13	.2	.9	.5	x b16	
<b>Bloc I</b>	x b17	.15	.1	.2	.9	.6	x b18	.3	.6	.15	.4	.11	x b19	<b>Bloc II</b>
	x b20	.4	.13	.14	.12	.5	x b21	.14	.10	.8	.7	.12	x b22	
	x b23	x b24	x b25	x b26	x b27	x b28	x b29	x b30	x b31	x b32	x b33	x b34	x b35	
	x b36	.5	.13	.9	.7	.1	x b37	.12	.1	.2	.3	.15	x b38	
<b>Bloc III</b>	x b39	.8	.3	.11	.12	.6	x b40	.11	.5	.8	.10	.4	x b41	<b>Bloc IV</b>
	x b42	.10	.14	.4	.15	.2	x b43	.13	.6	.14	.7	.9	x b44	
	x b45	x b46	x b47	x b48	x b49	x b50	x b51	x b52	x b53	x b54	x b55	x b56	x b57	
	x b58	.1	.12	.6	.14	.8	x b59	.5	.6	.1	.14	.12	x b60	
<b>Bloc V</b>	x b61	.10	.11	.13	.9	.7	x b62	.13	.10	.2	.8	.3	x b63	<b>Bloc VI</b>
	x b64	.2	.5	.3	.15	.4	x b65	.11	.15	.4	.9	.7	x b66	
	x b67	x b68	x b69	x b70	x b71	x b72	x b73	x b74	x b75	x b76	x b77	x b78	x b79	
	x b80	.2	.3	.7	.12	.5	x b81	.3	.2	.6	.11	.5	x b82	
<b>Bloc VII</b>	x b83	.4	.8	.13	.14	.10	x b84	.8	.4	.12	.1	.10	x b85	<b>Bloc VIII</b>
	x b86	.9	.6	.15	.1	.11	x b87	.9	.13	.15	.14	.7	x b88	
	x b89	x b90	x b91	x b92	x b93	x b94	x b95	x b96	x b97	x b98	x b99	x b100	x b101	

Distance de plantation 5,5m x 6m ; 15 variétés et 8 plants par variété (8blocs) ; 120 plants d'essai et 101 pomélo de bordure

**Légende :** x b: Pomélo Marsh Jabarito ; .1 Oranger Rotum ; .2 Oranger Torocco Chelif ; .3 Oranger Kwalta ; .4 Tangelo Sampson ; .5 Tangelo Williams ; .6 Tangor Ellendale ; .7 Tangelolo Wekwa ; .8 Mandarine Beauty ; .9 Mandarine Emperor ; .10 Mandarine Obala ; .11 Ponkan Yoshida ; .12 Lime sans épine ; .13 Lime Bearss ; .14 Pomélo Pink Ruby ; 15 Pomélo Oroblanco

**Tableau 4.3.** Récapitulatif du dispositif expérimental dans les différentes parcelles affectées à l'essai d'analyse de l'impact des facteurs environnementaux sur le comportement de différentes espèces de Citrus vis-à-vis de la phaeoramulariose.

Parcelles IRAD					
Sites	Parcelle	Espèce/variété	Nombre plants	de	Type d'association de plants
Foumbot	IRAD parcelle 2002	5 orangers, 5	20		Verger d'agrumes (15 variété)
		5 pomélos, 5	5		Verger d'agrumes (15 variétés)
Njombé		5 mandariniers	25		
		satsumas, 5			
Ekona	IRAD (parcelle 2006)	5 mandariniers			
		beauty, 5 limes	25		
Nkolbisson		tahiti	25		
Parcelles Paysannes					
Sites	Parcelle	Espèce/variété	Nombre plants	de	Type d'association de plants
Bokito	Kédia	3 pomélos, 10	16		Agrumes associés aux cacaoyers, autres fruitiers et arbres forestiers
		orangers, 3			
	Abanda	6 orangers, 4	10		
		mandariniers Madagascar			
Jakiri	Quartier Shey	6 pomélos, 6	12		Agrumes associés aux caféiers, autres fruitiers et cultures annuelles
		orangers			
	Route Foumban	6 orangers	6		
Kumba	Ekiliwindi	6 pomélos, 6	18		Verger d'agrumes (pomélos, mandariniers et orangers)
		mandariniers satsumas, 6			
		orangers			
Boumnyebel	Mahol	4 pomélos, 4	12		Agrumes associés aux autres fruitiers
		orangers, 4			
		mandariniers Madagascar			

#### **4.2.4 Collecte des données**

Plusieurs types de données ont été collectés dans cet essai, il s'agit des données sur l'évaluation de l'intensité de la maladie par l'observation des organes malades (feuilles, fruits), les données du sol, avec dans chaque parcelle le prélèvement d'un échantillon, les données géographiques (altitude, latitude et longitude) et les données climatiques obtenues des différentes stations météorologiques.

##### **a- Evaluation de l'intensité de la maladie**

La collecte des données dans les parcelles de l'IRAD et les parcelles paysannes s'est faite pendant 4 saisons fruitières successives (de septembre 2009 à mai 2011). Les données ont été collectées une fois par saison et par parcelle (septembre-octobre 2009 ; mai-juin 2010 ; janvier-février 2011 ; mai-juin 2011). Ces 4 saisons représentent 4 dates d'observation. Elles sont non seulement des saisons de pluies (sauf la date 3) mais également des saisons fruitières. Ce sont aussi des périodes de grande intensité de la maladie (Kuate, 2003). Des arbres d'agrumes choisis dans chaque parcelle ont été marqués à l'aide d'une plaque sur laquelle figurait des chiffres et des lettres indiquant le type d'essai, le site et le n° d'ordre de l'arbre (Figure 3.2). Dans les parcelles de l'IRAD, 25 arbres, en raison de 5 par espèce/variété, étaient observés. Dans les parcelles paysannes, le choix des espèces/variétés et du nombre d'arbres dépendait de la disponibilité. A chaque série d'observation, 10 pousses étaient choisies sur chaque arbre de façon aléatoire. Le choix se faisait de manière à avoir une bonne représentation symétrie de l'arbre (sommet, bas, gauche, droite, centre). Sur chacune des 10 pousses choisies, les 16 premières feuilles au maximum étaient sélectionnées en partant du bas vers le sommet de la pousse. Dans la même optique, sur chaque arbre, 40 fruits répartis équitablement sur les différentes branches de l'arbre étaient choisis. Les observations consistaient au comptage du nombre de lésions dues à la phaeoramulariose par feuille et par fruit.



**Figure 4.2.** Oranger portant une plaque d'observation dans la parcelle de Bokito.

La collecte des données dans le site de Nkolbisson n'a été possible que pendant la première date. Dans la suite des travaux, ce site n'était plus accessible. Les comparaisons effectuées avec d'autres sites ne sont valables que pour cette date. Il est également à signaler que pendant la première date d'observation, la majorité des arbres ne portait pas de fruits. Les observations à cette date n'ont donc été réalisées que sur feuilles.

### **b- Prélèvement des échantillons de sol**

Le type de sol ayant été identifié comme un des facteurs déterminants du développement de la maladie (Ndo *et al*, 2010), il nous est apparu nécessaire de le caractériser afin d'en déterminer les éléments ayant joué un rôle prépondérant. Dans cette optique, les échantillons de sols ont été prélevés à 2 couches à des profondeurs différentes à savoir 0-20 cm et 40-60 cm. (Dans les lignes qui suivent, ces couches seront assimilées à des horizons pédologiques et désignées comme tels). Ceci permettra de connaître la composition du sol dans l'aire prospectée par les racines. En effet, les racines des agrumes peuvent aller jusqu'à près de 4 m de profondeur, mais plus de 50% d'entre elles se limitent à 60 à 70 cm de profondeur (Noling, 2003). Le prélèvement se faisait à l'aide d'une tarière, dans l'intervalle entre les lignes et à proximité des arbres marqués. Plusieurs prélèvements ont été réalisés par horizon au niveau d'une parcelle pour former, après un mélange minutieux, un échantillon composite par parcelle et par horizon. De ces échantillons composites ont été extraits des sous-échantillons qui ont été soumis à l'analyse au Laboratoire d'Analyse des Sols, Plantes, Eaux et Engrais (LASPEE) de l'IRAD à Yaoundé. Ceci a permis de connaître la composition granulométrique/texteure, le pH, les teneurs en éléments nutritifs essentiels (N, P, K...), ainsi que la capacité d'échange cationique (CEC) des sols de nos parcelles. Pour les sites de Bokito et Jakiri qui présentaient plus d'une parcelle, les moyennes ont été calculées par site, de sorte à n'avoir que des données par site et non par parcelle. Le tableau 4.4 présente les variables utilisées pour caractériser les sols ainsi que l'unité de mesure dans laquelle s'exprime chacune de ces variables. Les normes de comparaison proposées dans la littérature (Landon, 1984 ; Landon, 1991 ; Shepherd & Walsh, 2002) sont également présentées dans ce tableau pour une meilleure caractérisation des sols.

### **c- Données climatiques et géographiques**

A chaque site correspondent des moyennes de données climatiques (température, humidité relative, pluviométrie) des 20 dernières années de la station météorologique la plus proche. Ces données météorologiques ont été obtenues à la Direction de la Météorologie nationale située à Douala (Cameroun). Elle centralise les données en provenance des stations de tout le pays.

Les altitudes et les coordonnées géographiques (latitude, longitude) étaient obtenues au pied de chaque arbre sélectionné à l'aide d'un GPS (Global Positioning System).

**Tableau 4.4.** Description des variables de sol étudiées.

Classe de variable	Description de la variable (et norme de comparaison)	Code	Unité de mesure
Composition granulométrique/texture	Teneur en argile	A	% de particules (par rapport à 100g de sol)
	Teneur en limons (grossiers + fins)	L	
	Teneur en sable (grossiers + fins)	S	
Acidité	Potentiel d'hydrogène : concentration en ions $H^+$ de la solution du sol (<7 sol acide ; = 7 sol neutre ; >7 sol alcalin)	pH eau	Sans dimension
Matières organiques	Matières organiques totales (<3.5 : très faible ; 3.5-6.9 : faible ; 4-9.9 : moyen ; 10-20 : élevé)	MO totales	% de CO/MO/N dans 100g de sol
	Carbone organique (<2 : très faible ; 2-3.9 : faible ; 7-17.2 : moyen ; 17.3-34.5 : élevé)	CO	
	Teneur en azote (<0.1 : très faible ; 0.1-0.19 : faible ; 0.2-0.49 : moyen ; 0.5-1 : élevé)	N	
	Rapport C/N : donne une idée degré de minéralisation de la MO du sol. C/N élevé >12 → degré de minéralisation faible (N minéral faible car N encore retenu par CO/MO sous forme organique)	C/N	Rapport sans dimension
Acide Phosphorique	Phosphore assimilable	P assimilable	mg/Kg de sol
Bases échangeables	Teneur en Calcium (<2 : très faible ; 2-5 : faible ; 5-10 : moyen ; 10-20 : élevé ; >20 très élevé)	Ca	Cmol/Kg de sol
	Teneur en Magnésium (<0.5 : très faible ; 0.5-1.5 : faible ; 1.5-3 : moyen ; 3-8 : élevé ; >8 très élevé)	Mg	
	Teneur en Potassium (<0.1 : très faible ; 0.1-0.3 : faible ; 0.3-0.7 : moyen ; 0.7-2 : élevé ; >2 très élevé)	K	
	Capacité d'échange cationique	CEC ou T	
	Somme des bases échangeables (<2.6 : très faible ; 2.6-6.8 : faible ; 6.8-13.6 : moyen ; 13.6-29.2 : élevé ; >29.2 très élevé)	S	%
	Taux de saturation : le rapport somme de bases échangeables sur capacité d'échange cationique ( $V=S/T \times 100$ )	V	

## 4.2.5 Analyses statistiques

### a- Variables de la maladie

L'intensité des symptômes d'une maladie est souvent évaluée à l'aide de 2 paramètres. Il s'agit de l'incidence qui est la proportion des unités malades par rapport à l'ensemble des parties analysées et de la sévérité qui est une évaluation quantitative du degré d'attaque (Lepoivre, 2003). Dans le cadre de cette étude, 3 variables nous permettent d'évaluer l'intensité de la maladie. Pour évaluer la sévérité, les paramètres utilisés sont le nombre moyen de lésions par feuille/fruit pour chaque arbre (Nles) et le nombre moyen de lésions par feuille/fruit malade et par arbre (Nlesm). Le Nlesm permet de connaître le degré de sévérité réel ou sévérité conditionnelle sur les organes qui présentent des symptômes. L'incidence de

la maladie est donnée par la proportion d'organes malades (Pom). Ces organes sont des feuilles ou des fruits. Le Pom se calcule par le rapport : Nombre total de feuilles/fruits malades sur nombre total de feuilles/fruits observés x 100.

## **b- Analyses de variance**

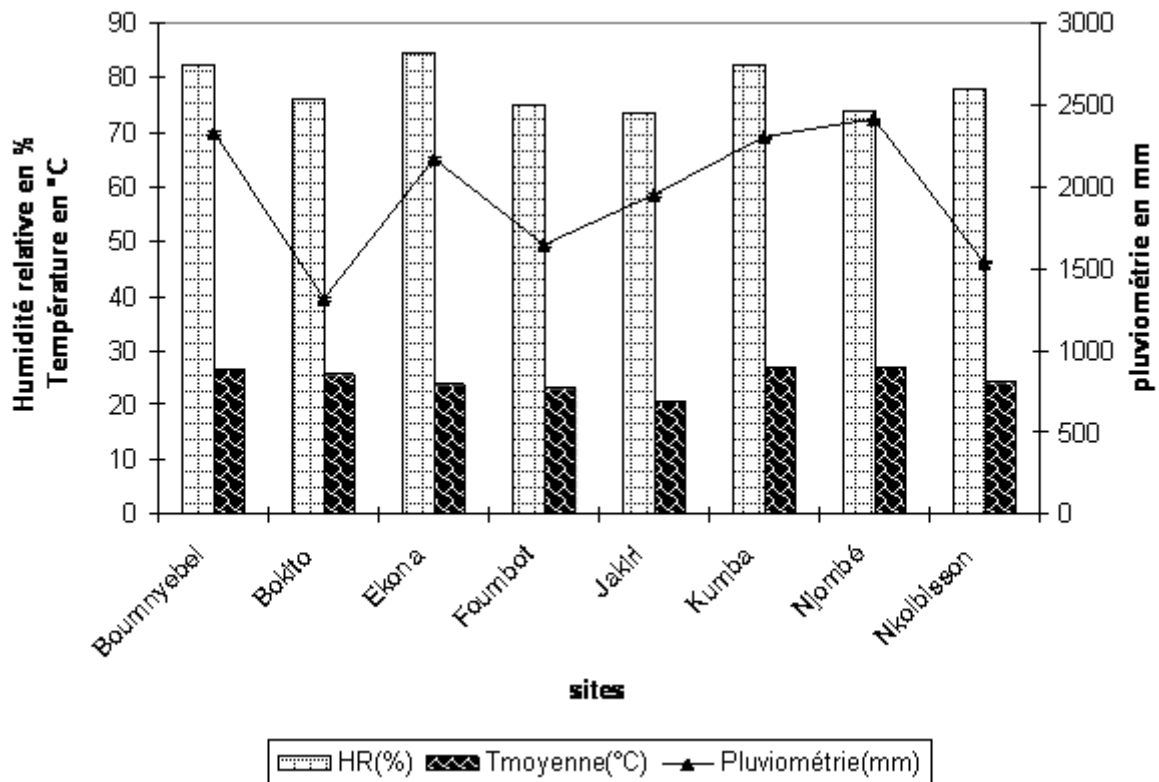
L'analyse des variances s'est faite avec le logiciel SAS version 9.2. Elle a été effectuée en utilisant la procédure GLM (modèle linéaire général). L'analyse de variance nous a permis de comparer les 4 dates d'observation afin de déceler si l'intensité de la maladie variait avec la période d'observation. Des analyses de variances ont également été effectuées pour comparer les différents sites en fonction de l'altitude, des paramètres climatiques et édaphiques. Ceci nous permettait de voir s'il fallait procéder à un regroupement des sites en fonction de ces différents paramètres. D'autres analyses de variances nous ont permis de comparer au sein de chaque site les différentes variétés d'agrumes en fonction des variables de la maladie. La comparaison s'est également effectuée entre les sites en fonction de l'intensité de la maladie de chaque variété d'agrumes. Etant donné la différence de systèmes de cultures, ces comparaisons se sont faites à l'intérieur de 2 groupes. Il s'agit du groupe de parcelles de l'IRAD et du groupe des parcelles paysannes. Le test de Student-Newman-Keuls au seuil de probabilité 5% a été utilisé à chaque fois pour comparer les différentes moyennes dans le but de procéder à un regroupement des variétés ou des dates d'observation ou des sites.

## **4.3 Résultats**

Les résultats font une description des différents sites d'étude en fonction des données climatiques et géographiques, et des paramètres du sol. Elle est suivie de la présentation des comparaisons des variétés d'agrumes au niveau de chaque site en fonction des variables de la maladie pour les 4 dates d'observation. La comparaison des sites en fonction des variables de la maladie de chaque variété est la dernière section des résultats.

### **4.3.1 Description des conditions climatiques et géographiques**

Les pluviométries moyennes annuelles varient de 1319.10 mm (Bokito) à 2409.7 mm (Njombé). Quatre sites présentent moins de 2000 mm de pluviométrie moyenne annuelle (Bokito, Nkolbisson, Foumbot et Jakiri). Les autres sites sont au-delà de 2000 mm (Figure 4.3). La température moyenne annuelle varie de 20.42°C (Jakiri) à 27.10° C (Njombé, Kumba). L'humidité relative varie de 73.5% (Jakiri) à 84.54% (Ekona). Parmi les 8 sites, 5 présentent une humidité relative inférieure à 80%. Tous les sites sont différents en terme de pluviométrie, température et humidité relative.



**Figure 4.3.** Température, humidité relative et pluviométrie moyennes des 20 dernières années dans les sites d'étude.

L'altitude varie de 92.1 m (Njombé) à 1571.4 m (Jakiri). Njombé est le seul site présentant une altitude inférieure à 100 m. On distingue 2 sites de haute altitude (Jakiri et Foumbot). Les autres sites présentent une altitude comprise entre 300 et 760 m (Tableau 4.5). Tous les sites présentent des différences significatives.

**Tableau 4.5.** Altitude et Coordonnées géographiques des différents sites.

Sites	Altitude (m)	latitude	Longitude
Boumnyebel	393.1	4°03	10°58
Bokito	488.7	3°38	11°09
Ekona	442.1	4°12	9°20
Foumbot	1010.5	5°28	10°33
Jakiri	1571.4	6°04	10°39
Kumba	300.4	4°45	9°29
Njombé	92.1	4°34	9°38
Nkolbisson	759.8	3°5	11°31

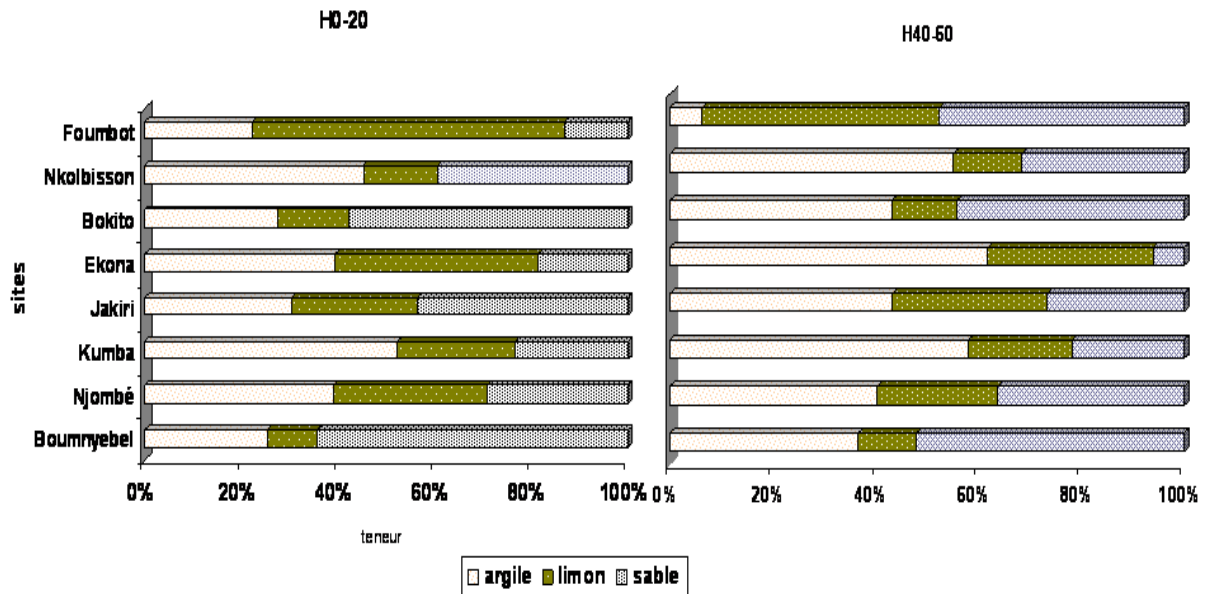
#### 4.3.2 Propriétés du sol

Les propriétés des sols sont décrites ici à travers leur texture, leur teneur en matière organique et leur teneur en éléments minéraux.



### a- Texture

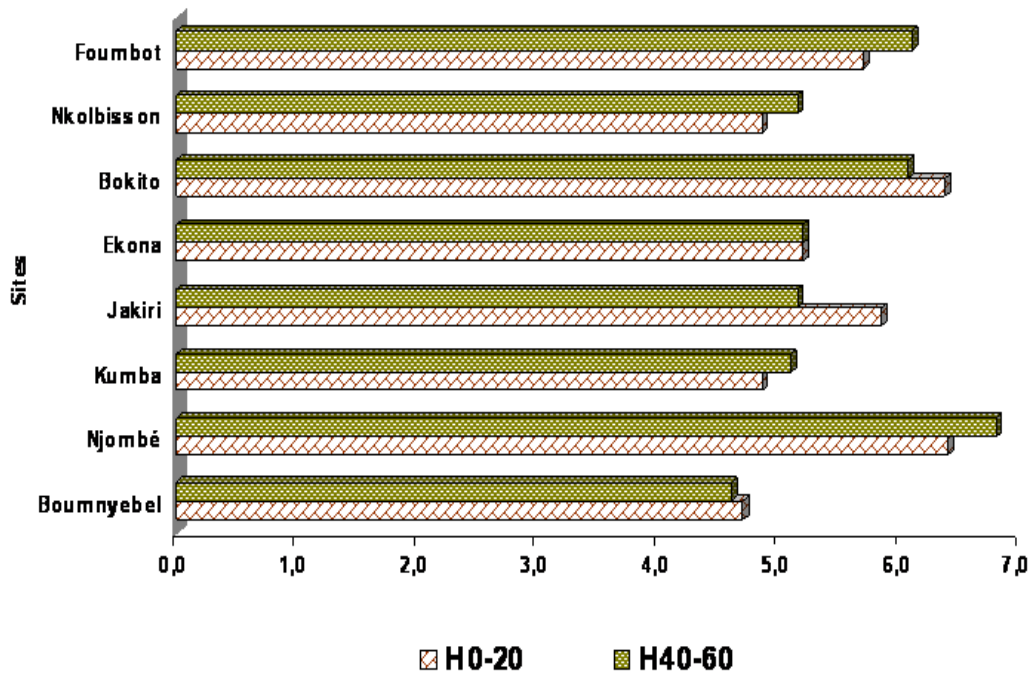
Les sols de Nkolbisson, Ekona, Kumba et Njombé ont une texture plus argileuse que sableuse. Cette teneur en argile est beaucoup plus accentuée pour tous les sols dans l'horizon 40-60 (Figure 4.4). Ceux de Boumnyebel, Bokito et Jakiri ont par contre une texture à prédominance sableuse. La teneur en limon à Foumbot et Ekona est plus élevée.



**Figure 4.4.** Teneur en argile, sable et limons des sols dans les sites d'étude au niveau des deux horizons H0-20 et H 40-60.

### b- pH et teneur en matières organiques

Les sols de tous ces sites sont en général acides (Figure 4.5). Le pH varie entre 4.7 et 6.4 pour l'horizon 0-20, et entre 4.6 et 6.8 pour l'horizon 40-60. Les sols du site de Boumnyebel est le plus acide, tandis que ceux de Bokito et Njombé sont les moins acides.



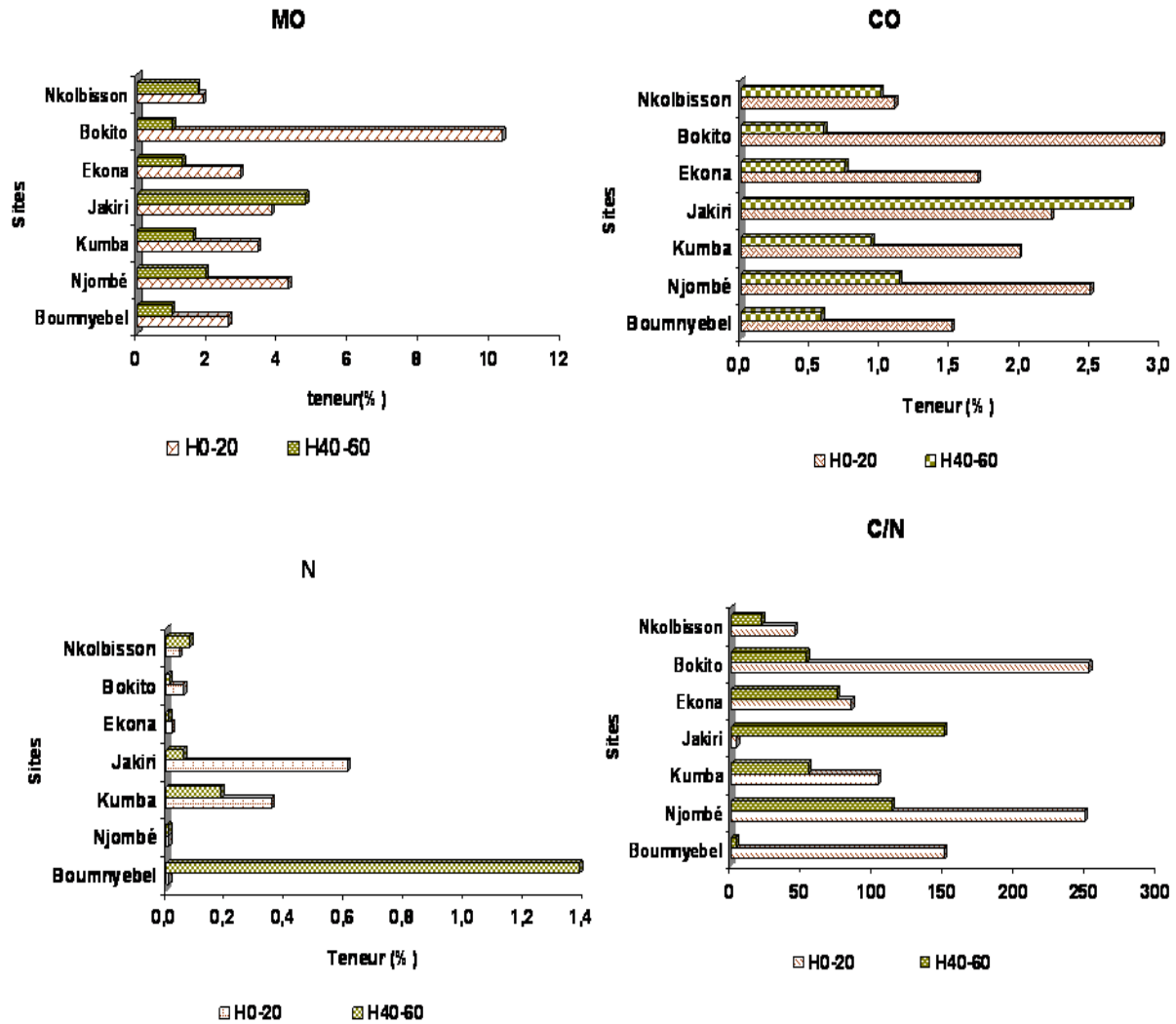
Figure

#### 4.5. pH des sols dans les sites d'étude niveau des deux horizons H0-20 et H 40-60.

Les variables qui permettent d'évaluer la matière organique dans cette étude sont la teneur en matière organique totale (ou la teneur en carbone organique), la teneur en azote et le rapport carbone sur azote (Figure 4.6). Le taux de matière organique (MO) dans tous les sites est plus élevé dans l'horizon 0-20, sauf à Jakiri où l'horizon 40-60 a un taux de MO supérieur à celui de l'horizon 0-20. Dans les sites de Nkolbisson, Ekona, Kumba et Boumnyebel, le taux de MO est très faible (<3.5%). Il est par contre élevé à Bokito où l'horizon 0-20 présente un taux de 10.33%.

En ce qui concerne la composition en azote, dans la majorité des sites elle est faible ou très faible (<0.2%). Le site Kumba présente un taux d'azote moyen (0.36%) dans l'horizon 0-20. Ce taux est élevé à Jakiri (0.61% dans l'horizon 0-20) et très élevé à Boumnyebel (1.39% dans l'horizon 40-60).

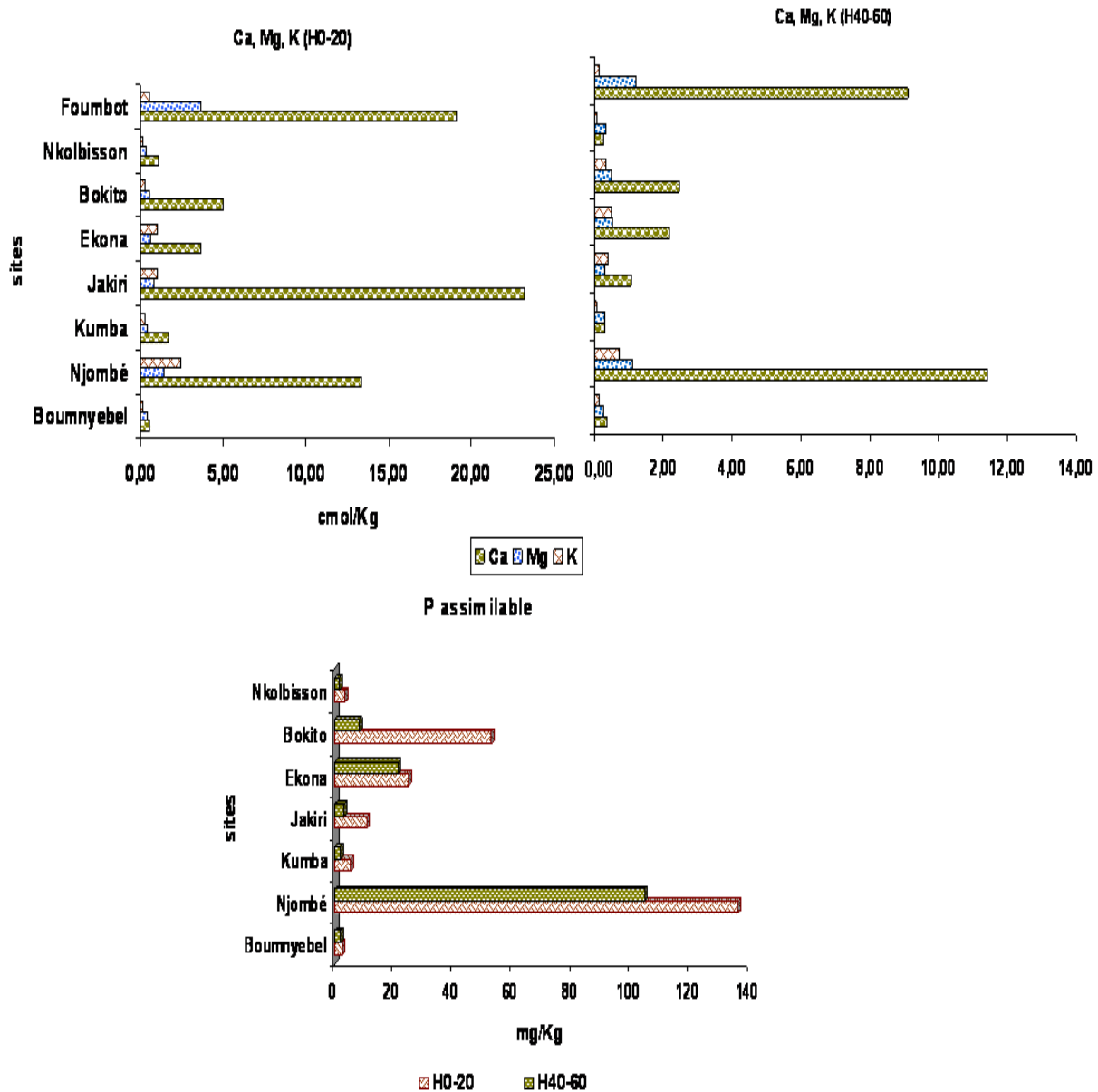
Le rapport C/N varie de 3.2 (Boumnyebel) à 252 (Bokito). A l'exception du site de Jakiri, ce rapport est toujours plus élevé dans l'horizon 40-60.



**Figure 4.6.** Teneur en matières organiques des sols des différents sites d'études dans les horizons 0-20 et 40-60.

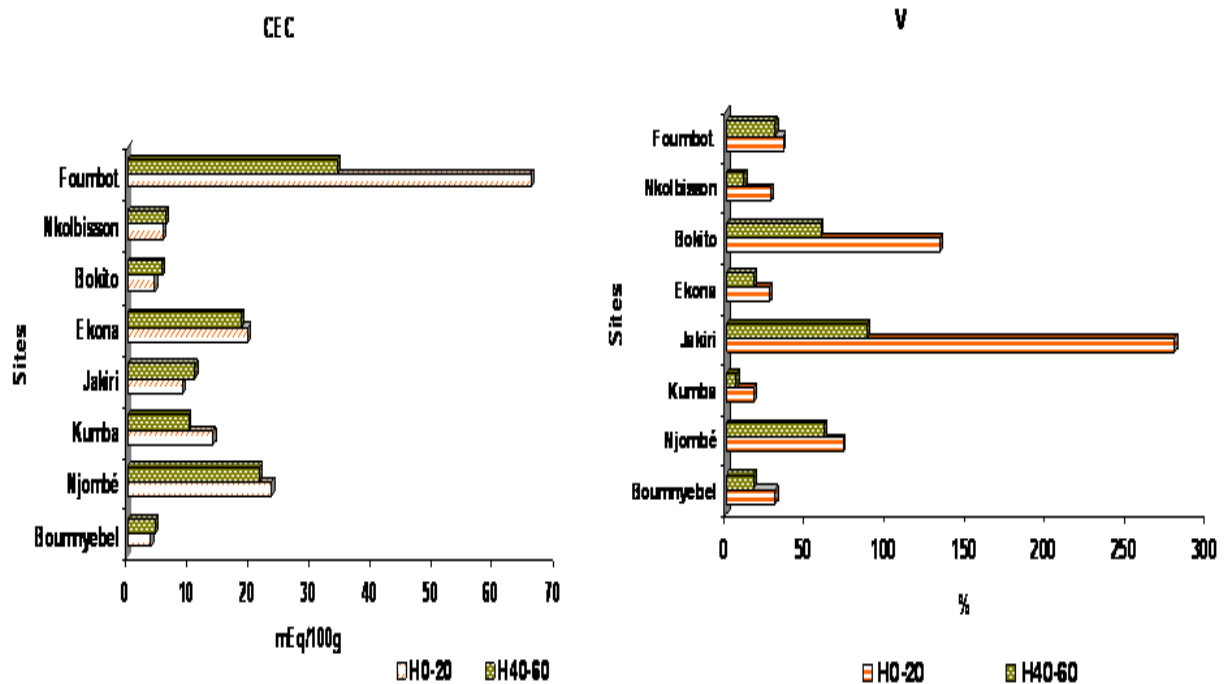
### c- Teneur en nutriments

L'allure des histogrammes (Figure 4.7) est la même en ce qui concerne la teneur des sols en Phosphore et en bases échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , et  $\text{K}^{+}$ ). Les taux les plus élevés se retrouvant à Njombé pour les 2 horizons, et les plus bas à Boumnyebel. Une exception est faite dans les sites de Jakiri et Foubot où l'horizon 0-20 présente une teneur en calcium élevée (19.1 et 23.19 cmol/Kg respectivement). La teneur en calcium est faible pour la moitié des sites ( $< 5 \text{ cmol/kg}$ ). Tous les sites d'étude ont une faible teneur en magnésium ( $< 1.5 \text{ cmol/Kg}$ ). En ce qui concerne le potassium, seuls les sites de Boumnyebel et Nkolbisson présentent de faibles teneur ( $< 0.3 \text{ cmol/Kg}$ ). Le taux de phosphore assimilables est plus élevé à Njombé, Ekona et Bokito.



**Figure 4.7.** Teneur en phosphore et bases échangeables des sols des différents sites d'étude dans leurs horizons 0-20 et 40-60.

La capacité d'échange cationique varie de 3.81 à 23.56 cmol/Kg. Les taux de saturations faibles proviennent des sites ayant une CEC élevée (Njombé, Ekona, Kumba, Nkolbisson) (Figure 4.8). Le site de Jakiri présente le taux de saturation le plus élevé (280.22%). Ce chiffre est dû à une somme de bases échangeables élevée 25.08 cmol/Kg et une CEC faible (8.95 cmol/Kg).

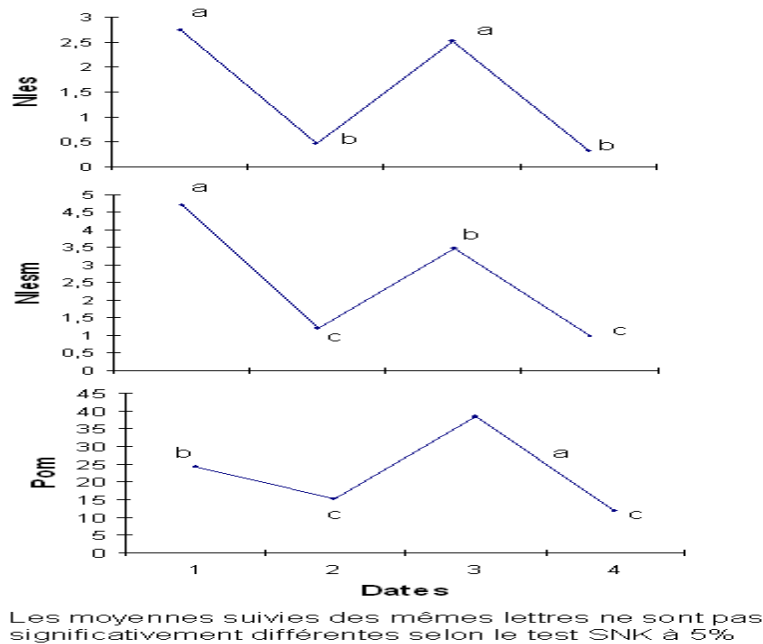


**Figure 4.8.** Capacité d'échange cationique et taux de saturation des sols des différents sites d'étude dans leurs horizons 0-20 et 40-60.

### 4.3.3 Caractérisation de la Phaeoramulariose dans les différents sites de l'étude

#### 4.3.3.1 Comparaison des dates d'observation

La comparaison des sites a été précédée d'une comparaison des dates d'observation, ceci afin de déterminer si certaines dates présentaient des résultats identiques ( $p= 5\%$ ), auquel cas la présentation des résultats pour toutes les dates serait superflue. Entre les dates 2 et 4, il n'a été trouvé aucune différence significative pour toutes les variables de la maladie (Figure 4.9). Il en est de même entre la date 1 et la date 3, uniquement pour la variable Nles. Pour les deux autres variables (Nlesm et Pom). Des différences significatives ont été trouvées entre les dates 1 et 3. Au vu de ce qui précède, nous nous proposons de présenter les résultats uniquement pour les dates 1, 2 et 3.



**Figure 4.9.** Comparaison des 4 dates d'observation par rapport aux variables de la maladie (Nles, Nlesm et Pom).

#### 4.3.3.2 Comparaison de la sévérité de la maladie entre les variétés d'agrumes dans chaque site de l'étude

Lors de la première série d'observation (date 1) les arbres ne portaient pas de fruits dans tous les sites. A cette date, seuls les résultats sur feuilles seront présentés.

L'accès au site de Nkolbisson n'a été possible que pendant la première série d'observation. Les résultats dans ce site ne seront présentés que pour la date 1.

##### ○ Site de Ekona

Sur feuilles, le nombre moyen de lésions (Nles) varie de 0.0 à 11.4 (Tableau 4.6). Le nombre moyen de lésions par feuille malade (Nlesm) varie 0.7 à 16.8. Le pourcentage de feuilles attaquées quant à lui va de 2.8 à 76.2. La sévérité de la maladie est plus élevée sur pomélo quelle que soit la variable concernée. La deuxième variété la plus attaquée est l'oranger. Les différences entre mandariniers satsuma, beauty et la lime Tahiti ne sont pas toujours significatives. Lorsqu'elles le sont, elles ne vont pas toujours dans le même sens. A certaines dates la satsuma est plus attaquée que la beauty et la lime, à d'autres dates c'est l'inverse. Les tendances sont légèrement différentes sur fruits en ce qui concerne le classement des variétés vis-à-vis des variables de la maladie. A la date 1, le Nles et le Nlesm sont plus élevés sur pomélo. A la date 2, ces variables sont plus élevées sur oranger. Le pourcentage de fruits malades est toujours plus élevé sur orangers. Il n'y a presque pas de différences significatives entre la mandarine Satsuma, la Beauty et la lime Tahiti. Toutes les variétés présentent des lésions à toutes les dates que ce soit sur feuilles ou sur fruits.

**Tableau 4.6.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site d'Ekona pendant trois dates d'observation.

Date	Variété	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	1	5.9±4.4b	10.1± 6.6b	46.4±28.8ab	.	.	.
	3	1.4±1.8c	3.5±4.4bc	20.4±21.8b	.	.	.
	4	3.3±2.2bc	5.7±2.1bc	56.8±31.2a	.	.	.
	5	0.6±0.5c	1.6±0.7c	31.7±29.1ab	.	.	.
	6	11.4±6.0a	16.8±8.4a	60.4±25.8a	.	.	.
2	1	1.0±1.5b	2.3±1.5b	30.2±27.1b	2.3±2.0b	3.2±1.7b	64.4±25.0a
	3	0.3±0.2b	1.4±0.3b	21.0±14.7bc	0.1±0.1b	0.7±0.7b	5.5±7.1b
	4	0.1±0.1b	1.4±1.0b	5.7±5.7c	0.1±0.1b	1.0±0.7b	9.4±9.4b
	5	0.0±0.0b	0.7±0.8b	1.8±2.4c	0.1±0.1b	0.5±1.2b	3.9±8.6b
	6	3.7±3.0a	4.7±2.9a	72.2±16.0a	6.9±6.4a	7.1±6.5a	60.1±48.1a
3	1	6.0±5.0ab	6.8±4.7ab	75.3±27.4a	7.4±6.0a	10.0±9.7a	67.5±37.0a
	3	2.5±1.5bc	3.7±1.4bc	62.9±18.4a	3.1±3.2ab	4.5±3.0ab	51.7±30.1a
	4	0.3±0.2c	1.7±0.5c	18.0±9.7cb	1.4±0.9b	5.1±3.9ab	23.8±20.5b
	5	0.4±0.3c	1.8±0.4c	23.4±16.3 b	0.0±0.1b	0.2±0.5b	1.4±4.2 c
	6	7.8±6.1a	8.4±5.6a	76.2±33.7a	3.2±5.2ab	4.0±5.7ab	32.0±40.5a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 3=satsuma ; 4=beauty ; 5=lime Tahiti ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### ○ Site de Foumbot

Le Nles sur feuilles varie de 0.0 à 16.9 (Tableau 4.7). Le Nlesm varie de 0.0 à 26.4. Le Pom varie de 0.0 à 92.6. S'agissant du Nles et du Nlesm, le pomélo enregistre les attaques les plus fortes, suivi de l'oranger. La lime présente les attaques les moins élevées. Toutefois les différences entre mandariniers satsuma, beauty et la lime Tahiti ne sont pas toujours significatives. Lorsque les différences sont significatives, elles ne vont pas toujours dans le même sens. S'agissant du Pom, il est assez élevé à la première date pour toutes les variétés. On ne note d'ailleurs aucune différence significative à cette date. Aux 2 dernières dates, le pomélo présente les Pom les plus élevés et les différences sont significatives. Sur fruits, les différences entre les 5 variétés ne sont pas significatives. L'oranger et le pomélo présentent cependant les plus fortes attaques.

**Tableau 4.7.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Foubot pendant trois dates d'observation.

Date	Variété	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	1	12.2±7.9a	19.3±12.1a	50.4±28.7a	.	.	.
	3	1.1±1.2a	2.7±2.2b	27.4±19.4a	.	.	.
	4	5.2±2.5b	8.9±4.6b	59.3±3.0a	.	.	.
	5	3.1±0.6b	4.0±0.6b	75.8±4.88a	.	.	.
	6	16.9±4.6b	26.4±9.1a	65.3±6.2a	.	.	.
2	1	0.3±0.1b	1.4±0.2b	20.8±47.2b	0.47±0.80a	1.65±1.90a	12.92±17.28a
	3	0.1±0.0b	1.2±0.3b	4.91±2.40b	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a
	4	0.3±0.2b	1.2±0.7b	17.0±12.8b	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a
	5	0.1±0.1b	1.1±0.7b	5.2±5.4b	0.11±0.11a	1.12±0.74a	7.00±5.42a
	6	1.3±1.4a	2.7±1.6a	39.5±21.2a	1.60±3.57a	1.60±3.57a	20.00±44.72a
3	1	7.7±3.0a	8.4±2.8a	91.4±13.6a	10.39±9.28a	10.75±9.14a	67.83±45.12a
	3	1.7±1.0b	3.0±1.2b	52.9±17.2b	0.68±1.17a	0.98±1.49a	25.63±37.00a
	4	8.2±3.1a	8.67±2.7a	92.6±7.4a	7.74±9.87a	8.28±9.78a	48.33±49.21a
	5	5.9±1.1a	6.6±0.8a	89.6±7.5a	0.92±0.14a	1.91±0.27a	48.00±3.70a
	6	9.5±4.6a	10.7±4.0a	84.8±71.5a	3.50±5.94a	4.19±5.69a	46.50±37.39a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 3=satsuma ; 4=beauty ; 5=lime Tahiti ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### ○ Site de Njombé

Sur feuilles, le Nles varie de 0.0 à 0.6. Le Nlesm varie de 0.0 à 1.8. Le Pom varie de 0.0 à 29.2. Aux deux premières dates, le site de Njombé ne présente pas de différences significatives entre les 5 variétés quelle que soit la variable considérée (Tableau 4.8). A la date 3, des différences significatives sont observées entre les pomélos et les quatre autres variétés, les pomélos présentant les attaques les plus sévères. Dans le groupe des quatre dernières variétés, les orangers sont toujours classés en tête et présentent les attaques les plus élevées. Mais les différences sont rarement significatives. Sur fruits, à toutes les dates, aucune différence significative n'est faite entre les 5 variétés quelle que soit la variable considérée. Toutefois, les attaques sur fruits sont notées uniquement sur orangers pomélos et limes.



**Tableau 4.8.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Njombé pendant trois dates d'observation.

Date	Variété	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	3	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	4	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	5	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	6	0.1±0.2a	0.5±1.2a	1.9±5.6a	.	.	.
2	1	0.0±0.0a	0.3±0.5a	0.5±0.9a	0.0±0.0a	0.1±0.3a	0.2±0.8a
	3	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	4	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	5	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	6	0.2±0.3a	0.7±0.8a	9.9±17.4a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
3	1	0.1±0.2b	1.3±1.3ab	5.4±6.7b	0.6±1.0a	1.6±2.0a	17.4±25.2a
	3	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	4	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	5	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.20±0.4a	0.6±1.1a
	6	0.6±0.1a	1.8±1.3a	23.4±23.4a	5.2±8.3a	6.1±10.1a	29.2±44.2a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 3=satsuma ; 4=beauty ; 5=lime Tahiti ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### ○ Site de Nkolbisson

Dans ce site, le Nles varie de 0.1 à 5.9 (Tableau 4.9). Le Nlesm varie de 1.5 à 9.9. Le Pom varie de 6.8 à 64.9. Les orangers présentent les attaques les plus élevées pour Nles et Nlesm. Mais les différences avec les pomélos ne sont pas toujours significatives. Les trois autres variétés (satsuma, beauty et lime Tahiti) sont classées dans le même groupe et aucune différence significative n'a pu être observée entre elles. S'agissant du Pom, il est plus élevé sur pomélo que sur oranger, mais les différences ne sont pas significatives.

**Tableau 4.9.** Comparaison de cinq variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Nkolbisson.

Date	Variété	Feuilles		
		Nles	Nlesm	Pom
1	1	5.9±3.3a	9.9±4.2a	58.5±11.4a
	3	0.4±0.3b	2.6±1.0c	13.3±8.9b
	4	0.1±0.1b	1.5±0.2c	6.8±2.6b
	5	0.5±0.4b	2.5±1.5c	19.5±11.2b
	6	4.1±1.6a	6.1±1.8b	64.9±7.9a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille malade; Pom = pourcentage de feuilles malades. 1=oranger ; 3=satsuma ; 4=beauty ; 5=lime Tahiti ; 6=pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### ○ Site de Bokito

Sur feuilles, le Nles varie de 0.0 à 0.7 (Tableau 4.10). Le Nlesm varie de 0.0 à 1.7. Le Pom varie de 0.0 à 17.8. Aucune différence significative n'a été observée entre orangers, pomélos et mandariniers madagascar quelle que soit la date ou la variable. Sur fruits, des différences significatives ont été observées aux dates 2 et 3. A la date 2, les pomélos présentent les taux d'attaques les plus élevés avec des différences significatives. A la date 3, les différences ne sont pas significatives.

**Tableau 4.10.** Comparaison de trois variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Bokito pendant trois dates d'observation.

Date	Variétés	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom (%)	Nles	Nlesm	Pom (%)
1	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	2	0.7±0.2a	1.0±1.3a	2.2±5.3a	.	.	.
	6	0.1±0.1a	1.3±1.1a	2.7±2.8a	.	.	.
2	1	0.1±0.1a	0.4±0.6a	3.1±7.5a	0.2±0.4b	1.2±1.2b	8.6±10.4b
	2	0.1±0.1a	0.7±0.6a	4.7±9.2a	0.0±0.0b	0.1±0.42b	0.9±3.0b
	6	0.0±0.0a	0.7±0.6a	1.7±1.5a	2.5±2.4a	3.3±2.5a	65.0±18.9a
3	1	0.3±0.5a	1.4±1.6a	9.9±17.7a	3.6±13.4a	4.5±13.4a	8.3±26.5a
	2	0.4±0.6a	1.1±1.4a	15.7±20.8a	0.6±1.4a	1.0±2.0a	16.4±24.2a
	6	0.3±0.3a	1.7±0.3a	17.8±15.9a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 2= madagascar ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

○ *Site de Boumnyebel*

Sur feuilles, le Nles varie de 0.0 à 0.9 (Tableau 4.11). Le Nlesm varie de 0.0 à 1.7. Le Pom varie de 0.0 à 25.0. Aucune différence significative n'a été observée entre orangers, pomélos, mandariniers Madagascar et Satsuma quelle que soit la date ou la variable. Sur fruits, aucune différence significative n'a été observée entre les 4 variétés. Toutefois, l'intensité de la maladie est plus élevée sur pomélos.

**Tableau 4.11.** Comparaison de quatre variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Boumnyebel pendant trois dates d'observation.

Date	Variétés	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom (%)	Nles	Nlesm	Pom (%)
1	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	2	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	3	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	6	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
2	1	0.1±0.1a	0.8±0.9a	5.7±7.0a	0.0±0.0a	0.5±1.0a	0.6±1.3a
	2	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	3	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	6	0.6±1.1a	1.5±1.4a	19.8±27.1a	0.7±0.8a	1.4±1.6a	37.0±44.8a
3	1	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.4±0.8a	1.1±2.1a	10.0±20.0a
	2	0.0±0.1a	0.3±0.6a	2.6±5.9a	5.9±13.1a	6.7±15.0a	17.5±39.1a
	3	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	6	0.7±1.1a	1.7±1.5a	23.0±30.8a	8.5±16.8a	11.6±21.7a	25.4±36.0a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 2= madagascar ; 3= satsuma ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

○ *Site de Jakiri*

Sur feuilles, le Nles varie de 0.0 à 4.3 (Tableau 4.12). Le Nlesm varie de 0.0 à 5.7. Le Pom varie de 0.0 à 58.6. Des différences significatives ont été observées uniquement à la date 3 pour les variables Nles et Nlesm. Le pomélo présente les plus fortes moyennes. Sur fruits, lorsque des différences significatives sont observées, le pomélo présente les moyennes les plus élevées.

**Tableau 4.12.** Comparaison de deux variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Jakiri pendant trois dates d'observation.

Date	Variétés	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom (%)	Nles	Nlesm	Pom (%)
1	1	0.5±1.0a	2.2±3.3a	7.8±10.9a	.	.	.
	6	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
2	1	0.1±0.2a	0.6±0.7a	5.4±10.1a	2.3±2.6b	3.7±2.9b	41.9±33.3a
	6	0.2±0.2a	1.3±0.7a	14.9±10.0a	17.8±16.4a	18.2±16.1a	77.1±38.9a
3	1	1.2±1.5b	3.1±1.6b	31.1±27.9a	3.08±5.04a	5.4±8.0a	27.7±31.2b
	6	4.3±3.4a	5.7±3.0a	58.6±37.4a	12.0±14.6a	13.4±14.2a	71.3±29.4a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### ○ Site de Kumba

Sur feuilles, le Nles varie de 0.0 à 12.2 (Tableau 4.13). Le Nlesm varie de 0.3 à 18.2. Le Pom varie de 1.0 à 82.9. Des différences significatives ont été observées entre les 3 variétés à toutes les dates et pour toutes les variables. En général, les pomélos obtiennent les plus fortes moyennes suivies des orangers. Les Satsumas présentent les moyennes les moins élevées. Toutefois, les différences ne sont pas significatives à toutes les dates. Sur fruits, on observe les mêmes tendances que sur feuilles.

he

**Tableau 4.13.** Comparaison de trois variétés d'agrumes par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose dans le site de Kumba pendant trois dates d'observation.

Date	Variétés	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom (%)	Nles	Nlesm	Pom (%)
1	1	3.2±3.2b	4.1±4.5b	41.7±30.3a	.	.	.
	3	0.0±0.0b	0.3±0.6b	1.3±2.5b	.	.	.
	6	12.2±4.1a	18.2±6.4a	68.1±39.6a	.	.	.
2	1	0.9±0.6b	2.4±1.0a	33.0±15.2b	2.2±2.2b	3.4±2.1b	48.9±28.8a
	3	0.0±0.0b	0.6±0.7b	1.0±1.4c	0.0±0.0b	0.3±0.5b	0.9±1.8b
	6	2.1±1.3a	3.0±1.2a	64.2±17.2a	17.7±10.9a	18.4±11.0a	79.3±39.0a
3	1	3.8±2.7a	4.8±2.6ab	68.8±28.2a	7.7±10.1a	9.7±10.4a	42.7±41.9a
	3	0.3±0.1b	1.79±0.7b	15.0±10.6b	0.0±0.0a	0.3±0.5a	1.3±2.5a
	6	6.3±2.8a	8.0±13.2a	82.9±23.3a	10.0±24.4a	10.2±24.3a	19.12±40.1a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruits; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. 1=oranger ; 3= satsuma ; 6= pomélo. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

### 4.3.3.3 Comparaison de la sévérité de la maladie entre les sites pour chaque variété

Les sites ont été classés en 2 groupes, les sites abritant les vergers expérimentaux de l'IRAD et dans lesquels ont été observés 5 variétés (orangers, pomélos, mandariniers satsuma, mandariniers beauty et lime Tahiti). Les sites abritant les parcelles paysannes dans lesquels 4 variétés ont été observées (orangers, pomélos, mandariniers madagascar et mandariniers satsuma). Il est à noter que dans ce second groupe tous les sites n'ont pas le même nombre de variétés.

#### a- Comparaison de la sévérité de la maladie entre les sites IRAD

##### • Sur orangers

Les orangers situés à Njombé présentent les moyennes les plus faibles sur feuilles et sur fruits pour le Nles, Nlesm et Pom sur toutes les dates d'observation (Tableau 4.14). Mais les différences ne sont pas toujours significatives. A la date 1, le site de Foubot a les moyennes les plus élevées sur orangers. Pendant les 2 dernières dates, les différences entre les sites d'Ekona et Foubot sont significatives uniquement sur fruits à la date 2 et c'est le site d'Ekona qui présente les moyennes les plus élevées.

**Tableau 4.14.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur orangers pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	Ekona	5.9±4.4b	10.1±6.6b	46.4±28.8a	.	.	.
	Foubot	12.2±7.9a	19.3±12.1a	50.4±4a	.	.	.
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0b	.	.	.
	Nkolbisson	5.9±3.3b	9.9±4.2b	58.5±11.4a	.	.	.
2	Ekona	1.0±1.5a	2.33±1.5a	30.2±27.1a	2.3±2.0a	3.18±1.7a	64.4±25.0a
	Foubot	0.3±0.1a	1.4±0.2a	20.8±7.2a	0.5±0.8b	1.7±1.9b	12.9±17.3b
	Njombé	0.0±0.0a	0.3±0.5b	0.5±0.9b	0.0±0.0b	0.1±0.3c	0.2±0.8b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.
3	Ekona	6.0±5.0a	6.8±4.7a	75.2±27.4a	7.4±6.0a	10.0±9.7a	67.5±37.0a
	Foubot	7.7±3.0a	8.4±2.8a	91.4±13.6a	10.4±9.3a	10.8±9.1a	67.8±45.1a
	Njombé	0.1±0.2b	1.3±1.3b	5.4±6.7b	0.6±1.0b	1.6±2.0a	17.4±25.2b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille malade; Pom = pourcentage de feuilles malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

##### • Sur mandariniers Satsuma

Sur feuilles, les moyennes les plus élevées sont retrouvées à Ekona, suivi de Foubot. Mais les différences ne sont pas toujours significatives (Tableau 4.15). Sur fruits, on n'observe pas de différences significatives entre les sites aux trois dates et pour toutes les variables, sauf pour la variable Pom à la date 3 où le site d'Ekona vient en tête, suivi de Foubot.

**Tableau 4.15.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers Satsuma pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
<b>1</b>	Ekona	1.4±1.8a	3.5±4.4a	20.4±21.8a	.	.	.
	Foumbot	1.1±1.2a	2.7±2.2a	27.4±19.4a	.	.	.
	Njombé	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	Nkolbisson	0.4±0.3a	2.6±1.0a	13.3.5±9.0a	.	.	.
<b>2</b>	Ekona	0.3±0.2a	1.4±0.3a	21.0±14.7a	0.1±0.1a	0.7±0.7a	5.5±7.1a
	Foumbot	0.1±0.0b	1.2±0.3a	5.0±2.4b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.
<b>3</b>	Ekona	2.5±1.5a	3.7±1.4a	62.9±18.4a	3.1±3.2a	4.5±3.0a	51.7±30.1a
	Foumbot	1.7±1.0a	3.0±1.2a	52.9±17.2a	0.1 ±1.8a	10.0±1.5a	25.6±37.0ab
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0b	0.0±0.0b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### • Sur mandariniers Beauty

Sur feuilles, les 3 variables de la maladie présentent les moyennes les moins élevées à Njombé et Nkolbisson (Tableau 4.16). Les moyennes les plus élevées sont retrouvées à Ekona, suivi de Foumbot. Mais les différences ne sont pas toujours significatives.

Sur fruits, on observe des différences significatives entre les sites à la date 2, Ekona présente les moyennes les plus élevées. On n'observe pas de différence significative entre Njombé et Foumbot.

**Tableau 4.16.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers Beauty pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
<b>1</b>	Ekona	3.3±2.2a	5.7±2.1a	56.8±31.2a	.	.	.
	Foumbot	5.2±2.5a	8.9±2.6a	59.3±2.94a	.	.	.
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	.	.	.
	Nkolbisson	0.1±0.1b	1.5±0.2b	6.8±2.6b	.	.	.
<b>2</b>	Ekona	0.1±0.1ab	1.4±1.0a	5.7±5.7b	0.1±0.1a	1.0±0.6a	9.4±9.4a
	Foumbot	0.3±0.2a	1.2±0.7a	17.0±12.8a	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.
<b>3</b>	Ekona	0.3±0.2b	1.7±0.5b	18.0±9.7b	1.4±0.1a	5.1±4.0a	23.8±20.5a
	Foumbot	8.2±3.1a	8.7±2.7a	92.6±7.4a	7.7±9.9a	8.3±9.8a	48.3±49.2a
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### • Sur limes Tahiti

Sur feuilles, les 3 variables de la maladie présentent les moyennes les plus élevées à Foumbot (Tableau 4.17). Ce site est suivi de celui d'Ekona, Nkolbisson et Njombé par ordre d'importance. Les différences entre ces trois derniers sites sont cependant rarement

significatives. Sur fruits, on observe les mêmes tendances. Toutefois, à la date 1, il n'y a pas de différences significatives entre tous les sites quelle que soit la variable.

**Tableau 4.17.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur lime Tahiti pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
<b>1</b>	Ekona	0.6±0.5b	1.6±0.7b	31.7±29.2b	.	.	.
	Foumbot	3.1±0.6a	4.0±0.6a	75.8±4.9a	.	.	.
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c	.	.	.
	Nkolbisson	0.5±0.4b	2.5±1.5b	19.5±11.2cb	.	.	.
<b>2</b>	Ekona	0.0±0.0a	0.7±0.8ab	1.8±2.4a	0.1±0.1a	0.5±1.2a	3.9±8.6a
	Foumbot	0.1±0.1a	1.1±0.7a	4.2±5.4a	0.1±0.1a	1.1±0.7a	7.0±5.4a
	Njombé	0.0±0.0a	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.
<b>3</b>	Ekona	0.4±0.3b	1.8±0.4b	23.4±16.3b	0.0±0.1b	0.2±0.5b	1.4±4.1b
	Foumbot	5.9±1.1a	6.6±0.9a	89.6±7.5a	0.9±0.1a	1.9±0.3a	48.0±3.7a
	Njombé	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c	0.0±0.0b	0.2±0.4b	0.1±1.3b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

#### • Sur pomélos

Les pomélos situés à Foumbot, Ekona et Nkolbisson présentent les moyennes les plus fortes. Cependant, les différences ne sont pas toujours significatives entre les sites de Foumbot, Ekona et Njombé (Tableau 4.18).

**Tableau 4.18.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose pomélos pendant trois dates d'observation.

série	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
<b>1</b>	Ekona	11.4±6.0b	16.8±8.4a	60.3±25.8a	.	.	.
	Foumbot	16.9±4.6a	26.4±9.1a	65.3±6.2a	.	.	.
	Njombé	0.1±0.2c	0.5±1.2a	1.9±5.6b	.	.	.
	Nkolbisson	4.1±1.6c	6.1±1.8a	64.9±7.9a	.	.	.
<b>2</b>	Ekona	3.7±3.0a	4.7±2.9a	72.2±16.0a	6.8±6.4a	7.1±6.5a	60.1±48.1a
	Foumbot	1.3±1.4b	2.7±1.6ab	39.5±21.2b	1.6±3.6b	1.6±3.6b	20.0±44.7ab
	Njombé	0.2±0.3b	0.7±0.8b	9.9±17.4c	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.
<b>3</b>	Ekona	7.8±6.1a	8.4±5.6a	76.2±33.7a	3.2±5.2a	4.0±5.7a	31.9±40.5a
	Foumbot	9.5±4.6a	10.7±4.0a	84.9±15.5a	3.5±5.9a	4.2±5.7a	46.5±37.4a
	Njombé	0.6±0.7b	1.8±1.3b	23.4±23.4b	5.2±8.3a	6.1±10.1a	29.2±44.2a
	Nkolbisson	.	.	.	.	.	.

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

**a- Comparaison de la sévérité de la maladie entre les sites paysans****• Sur orangers**

Sur feuilles et sur fruits, le site de Kumba présente les moyennes les plus élevées quelles que soient la date et la variable (Tableau 4.19). Le site de Jakiri vient en seconde position. Boumnyebel et Bokito sont les deux derniers sites. Toutefois les différences ne sont pas toujours significatives.

**Tableau 4.19.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur orangers pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	Bokito	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	.	.	.
	Boumnyebel	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	.	.	.
	Jakiri	0.5±1.0b	2.2±3.3ab	7.8±10.9b	.	.	.
	Kumba	3.2±3.2a	5.1±4.5a	41.7±30.3a	.	.	.
2	Bokito	0.0±0.1b	0.4±0.7b	3.1±7.5b	0.2±0.3a	1.2±1.2ab	8.6±10.4b
	Boumnyebel	0.1±0.1b	0.8±0.9b	5.7±7.0b	0.0±0.0a	0.5±1.0b	0.6±1.3b
	Jakiri	0.1±0.1b	0.6±0.7b	5.4±10.1b	2.3±2.6a	3.7±2.9a	41.9±33.3a
	Kumba	0.9±0.6a	2.4±1.0a	33.0±15.2a	2.2±2.2a	3.4±2.1a	48.9±28.8a
3	Bokito	0.3±0.5b	1.4±1.6bc	9.9±17.7bc	3.6±13.4a	4.5±13.4a	8.3±26.5a
	Boumnyebel	0.0±0.0b	0.0±0.0c	0.0±0.0c	0.4 ±0.8a	1.0±2.1a	10.0±20.0a
	Jakiri	1.2±1.5b	3.1±1.6ab	31.1±23.9b	3.1±5.0a	5.4±8.0a	27.7±31.8a
	Kumba	3.7±2.6a	4.8±2.6a	68.8±28.2a	7.7±10.1a	9.7±10.4a	42.7±41.8a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

**• Sur mandariniers Madagascar**

Les moyennes obtenues à Bokito sont en général les mêmes que celles de Boumnyebel sur feuilles et sur fruits et pour toutes les variables (Tableau 4.20). Néanmoins, à la date 2 sur Nlesm feuilles et fruits et sur Pom fruits, on observe des différences significatives. Ces différences ne vont pas toujours dans le même sens, Bokito ayant parfois de moyennes supérieures ou l'inverse.

**Tableau 4.20.** Comparaison de deux sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers Madagascar pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	Bokito	0.1±0.2a	1.0±1.8a	2.2±5.3a	.	.	.
	Boumnyebel	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
2	Bokito	0.1±0.1a	0.7±0.6a	4.7±9.2a	0.0±0.0a	0.1±0.4a	0.9±3.0a
	Boumnyebel	0.0±0.0a	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
3	Bokito	0.4±0.5a	1.1±1.4a	15.7±20.8a	0.6±1.3a	1.0±2.0a	16.4±24.2a
	Boumnyebel	0.0±0.1a	0.3±0.6a	2.6±5.9a	5.9 ±13.1a	6.7±15.0a	17.5±39.1a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls



- **Sur mandariniers Satsuma**

Les moyennes obtenues à Boumnyebel et Kumba ne sont en général pas significativement différentes sur feuilles et sur fruits et pour toutes les variables (Tableau 4.21). Seule la date 2 présente des différences significatives sur feuilles. A cette date, le site de Kumba a les moyennes les plus élevées.

**Tableau 4.21.** Comparaison de deux sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur mandariniers Satsuma pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	Boumnyebel	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	.	.	.
	Kumba	0.0±0.0a	0.3±0.6a	1.3±2.5a	.	.	.
2	Boumnyebel	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Kumba	0.0±0.0a	0.6±0.7a	1.0±1.4a	0.0±0.0a	0.3±0.5a	0.9±1.8a
3	Boumnyebel	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a
	Kumba	0.3±0.1a	1.8±0.7a	15.0±10.6a	0.0±0.0a	0.3±0.5a	1.3±2.5a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

- **Sur pomélos**

Sur feuilles et sur fruits, le site de kumba présente en général les moyennes les plus élevées quelle que soit la variable (Tableau 4.22). Le site de Jakiri se place au 2<sup>ème</sup> rang, mais les différences ne sont pas toujours significatives

**Tableau 4.22.** Comparaison de quatre sites par rapport à la sévérité de la Phaeoramulariose sur pomélos pendant trois dates d'observation.

Date	sites	Feuilles			Fruits		
		Nles	Nlesm	Pom	Nles	Nlesm	Pom
1	Bokito	0.1±0.1b	1.3±1.1b	2.7±2.8b	.	.	.
	Boumnyebel	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	.	.	.
	Jakiri	0.0±0.0b	0.0±0.0b	0.0±0.0b	.	.	.
	Kumba	12.2±4.1a	18.2±6.4a	68.1±9.6a	.	.	.
2	Bokito	0.0±0.2b	0.7±0.6b	1.7±1.5b	2.5±2.4a	3.3±2.4a	65.0±18.9a
	Boumnyebel	0.6±1.1b	1.5±1.4ab	19.8±27.1b	0.7±0.8a	1.4±1.6a	37.0±44.8a
	Jakiri	0.2±0.2b	1.3±0.7ab	14.9±10.0b	17.8±16.4a	18.2±16.1a	77.1±38.9a
	Kumba	2.1±1.3a	3.0±1.2a	64.2±17.2a	17.7±10.4a	18.4±11.0a	79.3±39.0a
3	Bokito	0.3±0.3b	1.7±0.3b	17.8±15.9b	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0b
	Boumnyebel	0.7±1.1b	1.7±1.5b	23.0±30.8b	8.5 ±16.8a	11.6±21.7a	25.4±36.0ab
	Jakiri	4.3±3.4ab	5.7±3.0ab	58.6±37.4ab	11.9±14.6a	13.4±14.2a	71.3±29.4a
	Kumba	6.3±2.8a	8.0±3.2a	82.9±23.3a	10.0±24.4a	10.2±24.3a	19.2±40.1ab

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille/fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade; Pom = pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

## 4.4 Discussions

### 4.4.1 Conditions climatiques, géographiques et édaphiques

L'analyse des données a montré une grande variabilité des sites tant au niveau des altitudes que des variables climatiques et édaphiques. Tous les sites sont significativement différents pour presque toutes les variables. Le regroupement des sites ne peut donc être effectué sur la base de ces facteurs. Il en ressort que le travail est mené dans un environnement diversifié.

La plupart des caractéristiques climatiques des différents sites correspondent bien à l'écologie de production des agrumes (Loussert, 1989 ; Anonyme, 2006). La pluviométrie moyenne annuelle est supérieure à 1300 mm dans tous les sites. Ce qui amène à penser que des apports en eau supplémentaires pour l'irrigation des agrumes ne sont nécessaires pour aucun site. En outre, la température moyenne annuelle dans tous les sites est  $>13^{\circ}\text{C}$  et  $<39^{\circ}\text{C}$ . Ce sont des températures idéales pour le développement des agrumes.

S'agissant particulièrement du sol, on observe une grande variabilité dans les sites en termes de composition en matières organiques et en nutriments. Dans la grande majorité des cas, les sites présentent des valeurs très faibles par rapport aux normes (Landon, 1984 ; Landon, 1991 ; Shepherd & Walsh, 2002). L'absence de fertilisation de ces parcelles peut expliquer la pauvreté de ces sols, la plupart de ces arbres ayant été plantés depuis plus d'une dizaine d'année. Ils ne bénéficient pas souvent d'apports minéraux autres que ceux présents dans le sol. Les sites de Jakiri, Bokito et Njombé se distinguent néanmoins par des taux plus élevés en matières organiques et en éléments minéraux. Les résultats obtenus à Bokito sont semblables à ceux obtenus dans ce site par d'autres auteurs sur des parcelles agroforestières à base de cacaoyers (Babin, 2009). Le caractère agroforestier des parcelles présentes dans les sites de Bokito, Jakiri et Boumnyebel peut expliquer ces teneurs en nutriments plus élevées (Shibu, 2009).

Toutes ces conditions édaphiques et climatiques permettent également le développement des bioagresseurs tel que *P. angolensis*. En effet, la présence de la maladie a été notée dans tous les sites. Toutefois, l'intensité de la maladie diffère d'un site à l'autre. Nous chercherons donc à connaître dans la suite de nos travaux les facteurs qui déterminent les niveaux de la maladie.

### 4.4.2 Comparaison de la sévérité de la maladie entre les variétés d'agrumes dans chaque site de l'étude

Il s'est avéré dans nos résultats que la deuxième date d'observation (mai-juin 2010) et la quatrième (mai-juin 2011) ne présentent pas de différences significatives au niveau de l'incidence et de la sévérité de la maladie dans les sites. Par contre, la première date d'observation (septembre-octobre 2009) et la troisième date (janvier-février 2011) sont significativement différentes pour certaines variables. Cependant, la date 1 est plus similaire à la date 3 qu'aux deux autres dates (2 et 4). Ces résultats permettent d'émettre l'hypothèse que lorsque les observations sont faites à la même période de l'année, les résultats ne diffèrent pas significativement d'une année à l'autre. En effet, les dates 2 et 4 sont les mêmes (mai-juin), par contre on a un décalage entre la date 1 (septembre-octobre) et la date 3 (janvier-février). L'intensité de la maladie est significativement plus élevée pendant les dates 1 et 3 que

pendant les dates 2 et 4. Ces résultats sont similaires avec ceux des études effectuées en zone forestière humide du Cameroun (Kuate *et al*, 1994 a et b). Lesdites études démontraient que les attaques de cercosporiose (devenue phaeoramulariose) sont beaucoup plus intenses pendant la 2<sup>ème</sup> saison des pluies de septembre-novembre que pendant la première saison de mars-juin.

Dans quatre sites (Ekona, Foumbot, Jakiri, Kumba), il ressort que le pomélo présente les attaques les plus sévères sur feuilles. Sur fruits il n'y a pas toujours de différences significatives entre pomélos et orangers, ils sont tous les deux plus attaqués que les autres variétés. Dans le site de Nkolbisson, les orangers viennent en tête suivis des pomélos. A Njombé, aux deux premières dates, on ne relève aucune différence significative entre les différentes variétés. Aux deux dernières dates les pomélos sont significativement plus attaqués. En ce qui concerne les sites de Bokito et Boumnyebel, aucune différence significative n'a été décelée entre les différentes variétés, mais les pomélos présentent les attaques les plus fortes. Ce résultat permet de confirmer, comme dans les travaux antérieurs, que les pomélos font partie du groupe dit « très sensibles » à la phaeoramulariose (Seif and Hillocks, 1998 ; Bella *et al*, 1999 ; Ndo *et al*, 2010). La différence entre pomélos et orangers n'est pas toujours significative, et lorsqu'elle l'est, le pomélo n'est pas toujours la variété la plus attaquée. Ceci s'observe dans les sites à forte incidence (Ekona, Jakiri, Kumba, Foumbot, Nkolbisson). Par contre dans les sites où l'incidence de la maladie est faible (Bokito, Boumnyebel, Njombé), le pomélo se démarque des autres variétés et aucune différence n'est faite entre orangers et les autres variétés moins sensibles.

Les mandariniers Beauty, Satsuma et la lime Tahiti ne présentent pas de différences significatives dans la majorité des sites. Dans les sites de Foumbot et Ekona où l'on observe des différences significatives entre ces trois variétés, on remarque le plus souvent que les mandariniers viennent en tête et présentent des moyennes plus élevées que la lime Tahiti. Par contre entre les deux variétés de mandariniers (Beauty et Satsuma) il est difficile de faire une distinction, l'une venant parfois avant l'autre et vice-versa. Il en est de même des comparaisons entre mandarinier Satsuma et Madagascar. Les précédentes études ont classé le mandarinier Satsumas et la lime Tahiti dans le groupe dit « peu sensibles » à la phaeoramulariose, et les autres variétés de mandariniers (madagascar et Beauty sont classées avec les orangers dans le groupe dit « sensibles » (Bella *et al*, 1999). Les résultats obtenus dans cette étude permettent d'affirmer une fois de plus que ce classement dépend du site (facteurs environnementaux). Les variétés/espèce ont des réponses différentes face à la maladie en fonction des sites. Ceci nous a amené à comparer les performances de chaque variété au sein des différents sites.

Ces résultats montrent que le degré de sensibilité d'une variété est fonction du site. A titre d'exemple, les pomélos et orangers sont les variétés les plus attaquées dans les sites d'Ekona, Foumbot, Jakiri, Kumba et Nkolbisson. Par contre, dans les sites Bokito, Boumnyebel et Njombé, le niveau d'attaque est le même pour toutes les variétés.

#### **4.4.3 Comparaison de la sévérité de la maladie entre les sites pour chaque variété**

Dans cette partie de la discussion, nous nous intéressons uniquement à l'incidence de la maladie qui est la proportion de feuilles/fruits malades (Pom), étant donné qu'on retrouve les

mêmes tendances sur les trois variables de la maladie. Le comportement de chaque variété vis-à-vis de la phaeoramulariose est comparé dans les différents sites.

En ce qui concerne les sites de l'IRAD, les orangers sont plus atteints à Foubot, Ekona et Nkolbisson, avec des Pom allant jusqu'à 91% sur feuilles et 51% sur fruits. On n'observe pas de différence significative entre ces sites qui sont par contre différents de celui de Njombé. Le site de Njombé présente des Pom faibles (5% sur feuilles, 16% sur fruits). Dans les sites paysans, les orangers sont plus atteints à Kumba (68% sur feuilles, 51% sur fruits). Dans les sites de Jakiri, Bokito et Boumnyebel, les différences observées ne sont pas significatives par rapport à cette variable. Ces deux résultats nous montrent qu'en dehors de l'altitude (ou les basses températures) dont les rôles ont été confirmés dans les études antérieures (Kuate, 2002), d'autres facteurs peuvent agir de façon déterminante sur l'incidence de la maladie. On constate en effet qu'Ekona et Nkolbisson, situés en moyennes altitude avec des températures élevées, ont les mêmes taux de maladie que Foubot situé en haute altitude (basse température). En outre, Kumba situé en moyenne altitude (température élevée) présente des taux de maladie plus élevés que Jakiri (haute altitude).

Les tendances observées sur orangers sont les mêmes sur pomélos et mandariniers satsumas. Dans le cas du pomélo, on constate que le site d'Ekona présente souvent des Pom plus élevés que Foubot. A certaines dates, on n'observe pas de différences significatives entre Njombé et Foubot.

En ce qui concerne la lime Tahiti et le mandarinier Beauty, les Pom à Foubot sont plus élevés qu'à Ekona et Nkolbisson. Mais les différences ne sont pas toujours significatives. Le site de Njombé présente très peu ou pas de maladie pour ces 2 variétés. La sévérité de la maladie pour ces variétés évolue avec l'augmentation de l'altitude et la diminution de la température.

Dans les sites de l'IRAD, le dispositif est le même (espèces/variétés, plans et protocole de suivi identiques). L'altitude, les variables climatiques et le type de sol sont différents. Lorsque l'on observe l'incidence de la maladie dans les différents sites, l'altitude seule ne permet pas d'expliquer les écarts. Une explication pourrait provenir du type de sol ou du climat.

Dans le cas des parcelles paysannes, les sites de Kumba, Bokito et Boumnyebel sont situés en moyenne altitude, tandis que le site de Foubot est situé en haute altitude. Cependant, sur orangers et pomélos, on observe une incidence de maladie plus forte à Kumba que dans les autres sites. La différence observée pourrait être liée au type de sol. Il a été démontré que le type de sol est un des facteurs qui influencent le développement de la maladie (Ndo et al, 2010). Cette différence pourrait aussi être liée au système de production. Il faudrait en effet relever que dans le cas des parcelles paysannes, les sites de Jakiri, Boumnyebel et Bokito ont des parcelles agroforestières, tandis qu'à Kumba il s'agit d'un verger pur d'agrumes. L'analyse de la structure spatiale d'une parcelle agroforestière nous a fait envisager que ce système, de par sa structure et sa composition, serait moins propice à la dissémination de la maladie qu'un verger comme celui de Kumba. Certaines études montrent d'ailleurs que le système de production peut donc jouer un rôle prépondérant sur le développement de la maladie. Dans les systèmes agroforestiers, les autres espèces associées peuvent parfois agir comme des barrières et réduire la progression de la maladie (Wolfe, 2000; de Vallavieille-Pope et al, 2004). Dans les parcelles agroforestières, nous avons en effet des arbres forestiers, d'autres espèces de fruitiers des cacaoyers et ou des caféiers qui peuvent jouer ce rôle.

Les résultats obtenus dans ce chapitre mettent en évidence l'influence de plusieurs facteurs sur le développement de la phaeoramulariose. En fonction des variétés d'agrumes, les facteurs peuvent être différents. On a ainsi constaté que pour les variétés les moins sensibles (lime Tahiti, mandarinier Beauty), l'incidence de la maladie augmente avec une élévation en altitude (ou une baisse de la température). Par contre, pour des variétés plus sensibles (pomélos, orangers, Satsumas), d'autres facteurs en dehors de l'altitude peuvent émerger. Il peut en effet s'agir du climat, du système de production ou du type de sol.

Lorsqu'on s'intéresse au type de sol, plusieurs paramètres peuvent être concernés. Il peut en effet s'agir de la texture du sol, de sa teneur en matières organiques, en nutriments majeurs (NPK) ou en micronutriment, de son pH. A ce titre, nous avons testé l'effet de 2 types d'application d'urée (46% d'azote) sur le développement de la maladie (Annexe), mais les résultats obtenus n'ont montré aucune différence significative entre les plantes témoin n'ayant reçu aucun apport d'urée et celles ayant reçu l'un des deux types d'apport testés. Ce résultat a été le même sur mandariniers et pomélos (qui sont les 3 espèces qui ont été utilisées dans cet essai) et dans tous les sites (Bokito, Njombé, Jakiri, Kumba et Boumnyebel). Ce résultat nous a amené à penser que le rôle de l'azote n'est pas déterminant dans le développement de la maladie.

Le poids de chacun de ces différents facteurs sera mis en évidence dans la construction d'un modèle de prédiction pour la gestion du risque épidémiologique (Chapitre 6).



## ***Chapitre 5 :***

### ***Effet de l'ombrage sur l'intensité de la maladie et distribution spatiale de la phaeoramulariose***





## Chapitre 5 : Effet de l'ombrage sur l'intensité de la maladie et distribution spatiale de la phaeoramulariose

### 5.1 Introduction

Les arbres d'ombrage jouent un rôle important sur les cultures à plus d'un titre. Ils peuvent améliorer les mauvaises conditions climatiques en modulant les variations de température (Schroch *et al*, 2000). Ils peuvent augmenter le taux de nutriments dans le sol à travers la production de grandes quantités de litière. Cependant, dans certains cas, ces arbres peuvent être en concurrence avec les cultures pour différentes ressources provoquant des ralentissements de croissance de ces dernières. Les effets de l'ombrage procuré par ces arbres sur le développement des bioagresseurs ont fait l'objet de plusieurs études. Il a été mis en évidence qu'une augmentation d'ombrage, peut entraîner sur les plantes, une augmentation de l'incidence de certaines maladies et de certains ravageurs ou à l'inverse diminuer cette incidence (Beer *et al*, 1998). Sur caféiers, les arbres d'ombrage à travers l'effet barrière de pluie ont montré un effet sur le développement de l'anthracnose des baies. En effet, il s'est avéré que les caféiers placés à l'ombrage des arbres fruitiers étaient moins attaqués par l'anthracnose des baies que ceux situés en plein soleil (Mouen *et al*, 2007). Sur cacaoyer, un ombrage homogène a permis de limiter les dégâts dus aux mirides (Babin *et al*, 2011).

Les effets de l'ombrage sur le développement de *Pseudocercospora angolensis* sont mal connus. Il est reconnu qu'une humidité relative élevée (>60%) et des conditions de température fraîches (<25°C) favorisent le développement de la maladie (Seif et Hillocks, 1998 ; Kuaté *et al*, 2002). Par ailleurs, sachant que l'ombrage favorise ces conditions, on est amené à supposer qu'au sein d'une parcelle, les arbres situés sous ombrage présenteraient une incidence de la maladie plus élevée que ceux situés en plein soleil. D'un autre point de vue, étant donné le rôle joué par les arbres d'ombrage dans l'amélioration des conditions climatiques et nutritionnelles, la croissance des arbres cultivés dans ces conditions peut être améliorée ainsi que leur vigueur et leur réaction face à la maladie. En outre, les arbres d'ombrage peuvent jouer un rôle de barrière contre le vent et la pluie (principaux facteurs de la dissémination des conidies) et ralentir la progression de l'épidémie.

Au cours de l'enquête réalisée dans les différents bassins de production des agrumes dans les zones humides du Cameroun (Ndo *et al*, 2010), l'ombrage a été pris en compte comme un des facteurs pouvant influencer l'évolution de la maladie. Mais les situations des arbres par rapport à l'ombrage étaient multiples et différentes. Il nous est apparu en fin de compte difficile d'évaluer objectivement l'effet de l'ombrage à travers une enquête. C'est donc par deux expérimentations que nous avons étudié l'effet de l'ombrage sur le développement de la phaeoramulariose. L'une des expérimentations s'est faite sur des mandariniers âgés de 15 ans environ dans une parcelle paysanne agroforestière de Bokito. Tandis que l'autre a été réalisée sur jeunes plants de pomélo placés sous un verger de manguiers et d'avocatiers. L'objectif de cette étude était de préciser le rôle de l'ombrage dans le développement de la phaeoramulariose des agrumes. Cette étude permettra également de mettre en évidence la distribution spatiale de la maladie dans la parcelle monospécifique de Foubot.

## **5.1 Matériel et méthodes**

### **5.1.1 Choix des sites et parcelles**

Deux sites ont été choisis pour cette étude :

- Le premier est celui de Foumbot (latitude 5°30'N, longitude 10°37'E, altitude 1010m). Ce site a été choisi pour ses conditions favorables à la maladie (haute altitude et basse température) (Kuate *et al* 1998). La présence d'anciennes parcelles d'agrumes dans le site, avec des arbres malades garantit la présence de l'inoculum.
- Le deuxième site, situé à Bokito (latitude 4° 38'N, longitude 11°09E, altitude 480m) dans une parcelle agroforestière, présente des arbres d'agrumes âgés d'environ 15 ans. Dans cette parcelle, les agrumes sont en association avec des cacaoyers, certains fruitiers, des palmiers à huile et des arbres forestiers appartenant à différentes espèces (*Cola acuminata*, *Chlorophora excelsa*, *Adansonia digitata*, *Voacanga africana*).

### **5.1.2 Dispositif expérimental/Description des parcelles**

#### **5.1.2.1 Parcelle de Bokito**

Dans cette parcelle, les agrumes sont en association avec les cacaoyers, les palmiers à huile, différentes espèces d'arbres forestiers et divers autres fruitiers (safoutiers, avocatiers, manguiers, pommiers cythère, bananiers). Trois espèces d'agrumes sont présentes ici, il s'agit des mandariniers qui sont l'espèce dominante, des orangers et de quelques jeunes pomélos. L'espèce choisie pour cet essai est le mandarinier. Ce choix est lié à la présence de 6 mandariniers à l'ombre de grands arbres forestiers. Ainsi, ces mandariniers situés à l'ombre ont été comparés à 6 autres situés en plein soleil.

#### **5.1.2.2 Parcelle de Foumbot**

##### ***a- Suivi des plants en pépinière***

A la pépinière, 70 plants de pomélo issus du greffage sur *Citrus volkameriana* ont été suivis pendant un an. L'entretien des plants consistait en un traitement fongicide tous les 15 jours dès l'apparition des nouvelles pousses pendant toute la durée de la saison pluvieuse (Kuate, 2003). Le fongicide utilisé est un fongicide de contact : Hydrox super (77% d'hydroxyde de cuivre  $\simeq$  50% de cuivre métal). Le fongicide était mélangé à l'insecticide Chloroforce ethyl (Dursban ou pyroforce 40 ml dans 15 l d'eau). Lors de la mise en place de l'essai, tous les plants étaient sains et ne présentaient aucune lésion sur les feuilles.

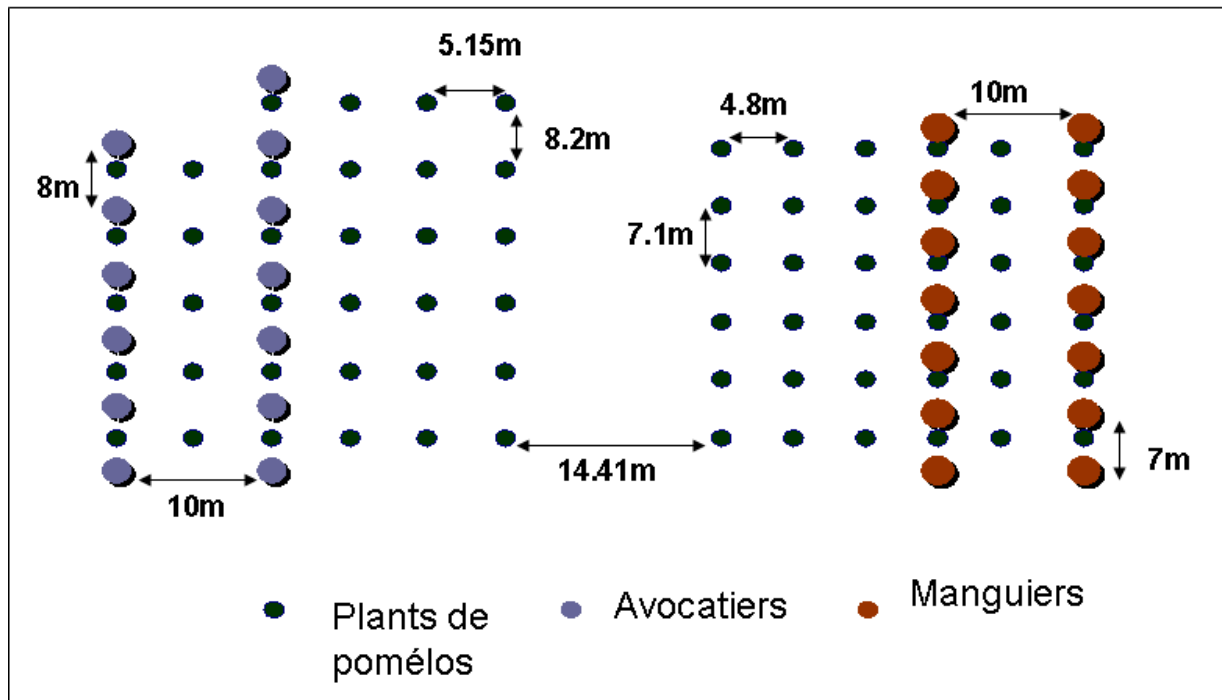
### ***b- Mise en place de l'essai***

L'essai a été implanté dans le verger expérimental de l'IRAD. Ce verger comprend des parcelles de collection de manguiers, avocatiers et agrumes séparées les unes des autres par des parcelles de terrain en friche souvent réservées aux cultures annuelles. Ce verger présente donc un gradient de luminosité selon que l'on se trouve sous les arbres fruitiers ou sur les parcelles en friche. Le verger est situé dans une zone où l'incidence de la maladie est élevée en raison de la présence d'anciennes parcelles d'agrumes déjà sujettes à la phaeoramulariose. La mise en place de l'essai s'est effectuée dans la portion comprenant une parcelle de manguiers et une parcelle d'avocatiers séparées par une bande de terrain de 45 m de largeur. L'essai a été installé en utilisant les deux dernières lignes de la parcelle de manguiers, les deux premières lignes de la parcelle d'avocatiers et l'espace inter-parcellaire. La superficie totale de cet essai est de 3300 m<sup>2</sup> (66mx50m). Les écartements entre manguiers sont de 7x10m et entre avocatiers de 8x10m. Les avocatiers et les manguiers sont âgés de 30 ans et mesurent environ 5 à 7 m de hauteur.

Les plants issus de la pépinière ont été mis en place sous ces avocatiers et manguiers et dans l'espace inter-parcellaire. Dans la parcelle de manguiers, les écartements entre pomélos sont de 4.8 x 7.1m. Au total, 36 plants de pomélos ont été mis en place en 6 lignes soit 6 plants par ligne. Sous les 2 lignes de manguiers, 3 lignes de pomélos ont été plantés dont une entre les 2 lignes de manguiers et une sur chacune des 2 lignes de manguiers ; 3 lignes de pomélos ont été placées en plein soleil dans l'espace inter-parcellaire jouxtant la ligne de manguiers. Dans la parcelle d'avocatiers, les écartements entre pomélos sont de 5.15 x 8.2m. Au total, 34 plants de pomélos ont été mis en place en 6 lignes, les 2 premières lignes comportent chacune 5 plants et les 4 autres ont chacune 6 plants. Les dispositions sont les mêmes que pour la parcelle de manguiers à savoir 3 lignes sous les arbres et 3 lignes en plein soleil. Les 2 parcelles sont contigües ; la distance entre les 2 est 14.41 m. Cette parcelle a été mise en place en juillet 2010.

### ***c- Cartographie de la parcelle***

Le plan de la parcelle a été inséré dans un repère orthonormé. En fonction des distances entre les plants, des coordonnées X Y ont été attribuées à chaque plant de pomélo et à chaque manguiers et avocatier situé dans la parcelle. Ces coordonnées ont permis d'effectuer une cartographie de la parcelle. Elles ont également permis de procéder à l'analyse de la répartition spatiale avec les données de la maladie. La figure 5.1 représente le plan de la parcelle.



**Figure 5.1.** Plan de la parcelle d'essai d'ombrage à Foubot.

### 5.1.2.3 Entretien des arbres

Au niveau des 2 parcelles, un désherbage manuel ou au Roundup (Glyphosate) était effectué régulièrement. Des traitements insecticides réguliers à l'aide du même insecticide utilisé en pépinière étaient effectués.

### 5.1.3 Collecte des données

Les données collectées sont des données sur la sévérité de la maladie et sur l'ombrage. Une distinction est faite entre les deux parcelles étant donné qu'il s'agit de deux systèmes différents avec des protocoles différents.

#### 5.1.3.1 Parcelle de Bokito

- *Sévérité de la maladie*

La collecte des données dans cette parcelle s'est faite pendant 4 saisons fruitières successives (de septembre 2009 à juin 2011). Les données ont été collectées une fois par saison (septembre 2009 ; juin 2010 ; janvier 2011 ; juin 2011). Les mandariniers choisis ont été marqués à l'aide d'une plaque. Pour observer la maladie, 10 pousses étaient choisies sur chaque arbre de façon aléatoire, tout en s'assurant d'avoir une bonne représentation de la symétrie de l'arbre. Sur chacune des 10 pousses choisies, les 16 premières feuilles au maximum étaient sélectionnées en partant du bas vers le sommet de la pousse. Dans la même

optique, sur chaque arbre, 40 fruits répartis équitablement sur les différentes branches de l'arbre étaient choisis. Les observations consistaient au comptage du nombre de lésions dues à la phaeoramulariose par feuille et par fruit.

### **5.1.3.2 Parcelle de Foumbot**

- **Sévérité de la maladie**

A cause du délai qu'a nécessité le suivi des plants en pépinière, la collecte des données sur la maladie dans cette parcelle n'a pu être effectuée qu'à deux reprises. Les données ont été collectées en janvier et en mai 2011. Les pousses les plus jeunes étaient observées. Un maximum de 10 pousses et 16 feuilles par pousse étaient observés sur chaque plant. Le nombre de lésions par feuille était noté lors de chaque série d'observation.

- **Ombrage**

A la deuxième date d'observation, les deux diamètres perpendiculairement opposés de la frondaison des arbres d'ombrage ont été mesurés. Le diamètre moyen de la frondaison a été calculé sur la moyenne des deux mesures effectuées. Un indice d'ombrage sur une échelle de 1 à 10 (en fonction du degré de lumière filtrant à travers la canopée) a été attribué à chaque arbre d'ombrage. Dans cette échelle, 10 représente une canopée complètement opaque qui ne laisse pas passer de lumière, 5 une canopée avec 50% de la surface infiltrée par la lumière et 1 une canopée très perméable à la lumière se rapprochant de la situation de plein soleil. Ces deux paramètres ont permis d'avoir une estimation quantitative de l'ombrage des arbres. Une analyse de corrélation a permis de relever une forte corrélation entre ces deux paramètres. L'indice d'ombrage a été représenté sur les cartes à bulles pour illustrer l'évolution de la maladie avec ce paramètre.

### **5.1.4 Analyses statistiques**

#### **5.1.4.1 Variables dérivées**

La variable expliquée est la sévérité de la maladie, exprimée par le nombre de lésions par feuille ou le nombre de lésions par fruits. Pour avoir les données par arbre, de nouvelles variables ont été générées par des calculs. Ces variables sont les suivantes :

- Nles (nombre moyen de lésion sur feuille/fruit) = Nombre total de lésions /Nombre total de feuilles/fruits observés.
- Nlesm (nombre moyen de lésion sur feuille/fruit) = Nombre total de lésions /Nombre total de feuilles/fruits malades.
- Pom (pourcentage d'organes malades) = Nombre total de feuilles ou fruits malades/ nombre total de feuilles ou fruits observées x100.

Les deux premières variables (Nles et Nlesm) nous donnent une idée de la sévérité de la maladie pour chaque arbre. Nlesm est une sévérité conditionnelle. La variable Pom représente l'incidence de la maladie.

#### **5.1.4.2 Analyses de variance**

L'analyse des données s'est faite avec le logiciel SAS version 9.2. L'analyse de variance a été effectuée en utilisant la procédure GLM (modèle linéaire général). Pour comparer les différentes moyennes de sévérité de phaeoramulariose sur agrumes en fonction du type d'ombrage et pour chaque série d'observation, le test de Student-Newman-Keuls au seuil de probabilité 5% a été utilisé. A Foubot, les pomélos mis sous manguiers ont été comparés à ceux placés sous avocats et en pleine lumière pendant les 2 séries d'observation. A Bokito, les mandariniers en pleine lumière ont été comparés à ceux sous ombrage des arbres forestiers pendant 4 séries d'observation.

Une deuxième analyse de variance a été effectuée sur les données de Foubot avec le logiciel R version 2.13.1 en utilisant le package gstat. Elle a permis de mettre en évidence la part de la variance due aux effets testés (ombrage, date d'observation, interaction).

#### **5.1.4.3 Cartographie des variables de sévérité de la phaeoramulariose et de l'ombrage**

Elle a permis d'illustrer l'intensité de la phaeoramulariose à travers les 3 variables (nles, nlesm, pom). Cette cartographie s'est faite sur des cartes à bulles réalisées avec le logiciel R version 2.13.1 à travers les packages, lattice et lattice Extra. La taille de chaque bulle est proportionnelle à l'importance de la maladie. Sur un deuxième graphique, qui illustre la position des arbres d'ombrage ainsi que l'importance de l'ombrage a aussi été réalisé selon la même méthode.

#### **5.1.4.4 Analyse des résidus**

L'explication de la part de variance non expliquée par l'ombrage, la date d'observation et de l'interaction a été faite à travers une analyse de résidus. L'analyse des résidus a été effectuée avec le logiciel R version 2.13.1. Elle nous a permis de mettre en évidence, en dehors des facteurs testés, un autre facteur de variabilité des différentes moyennes. L'importance des résidus a été représentée sur des graphiques selon le même principe qu'au paragraphe précédent. Lors de l'analyse des résidus, l'hypothèse émise était que la part de variance non expliquée par le modèle serait due à la structure spatiale de la maladie. Pour vérifier cette hypothèse, une analyse spatiale des résidus a été effectuée.

#### **5.1.4.5 Analyse spatiale**

L'analyse spatiale s'est faite sur les résidus. Elle a ainsi permis après avoir annulé les effets de l'ombrage, de la date d'observation et de l'interaction (s'il y en avait) de déceler si la répartition de la maladie se faisait de façon aléatoire ou selon un modèle spatial particulier. Elle a été réalisée à l'aide de l'analyse des semi-variogrammes du logiciel GS+ (version 9 ; Robertson, 2008). Le principe de cette analyse est de mesurer la dépendance spatiale qui existe entre les points (arbres) mesurés ; les semi-variogrammes représentent les écarts quadratiques moyens entre les points  $x_i$  et  $y_j$  en fonction des distances qui séparent ces points. La semi-variance est donnée par l'équation :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_i - z_{i+h})^2$$

Dans cette équation,  $\gamma(h)$  le semi-variogramme est calculé pour les  $N(h)$  points  $x_i$  et  $y_j$  séparés par une distance  $h = |x_i - y_j|$ .  $z_i$  est la sévérité de la maladie au point  $i$  et  $z_{i+h}$  est la sévérité de la maladie au point  $i+h$ .  $h$  est exprimé en m. (Gratton, 2002).

Le logiciel donne les paramètres descriptifs suivants pour le semi-variogramme :

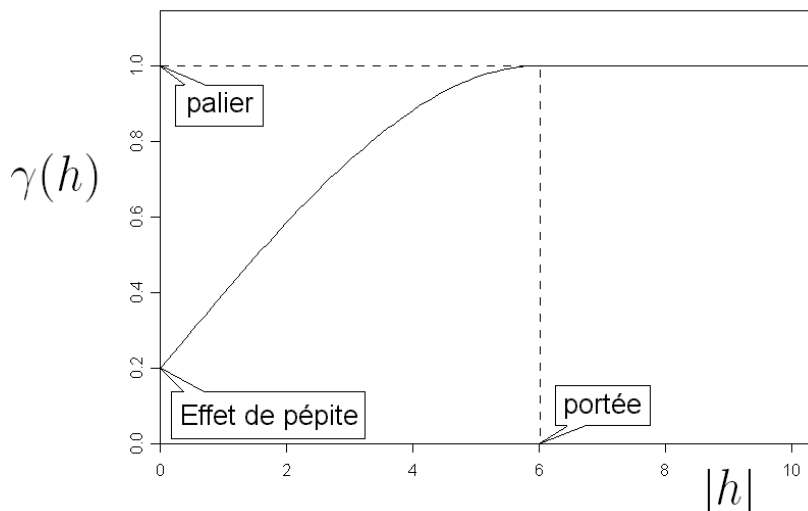
$C_0$  : l'effet pépité est la valeur  $y$  à laquelle la courbe du modèle coupe l'axe des  $y$  ;

$A$  : Le semi-variogramme peut ou non atteindre un plateau. L'atteinte d'un plateau indique qu'à partir d'une certaine distance il n'y a plus de dépendance spatiale entre les données. Cette distance est nommée la portée ( $A$ ) ;

$C_0 + C$  : Le palier, c'est la variance à laquelle le plateau se présente. Le palier est atteint grâce à une asymptote (Figure 5.2).

Un modèle théorique est ajusté au semi-variogramme expérimental. La somme des carrés des résidus (RSS), le coefficient de détermination  $r^2$  et le ratio  $C / (C_0 + C)$  permettent de choisir le modèle théorique qui s'ajuste le mieux au semi-variogramme observé.

Lorsque le ratio  $C / (C_0 + C) = 1$ , le semi-variogramme n'a pas d'effet pépité, si  $C / (C_0 + C) = 0$  le semi-variogramme est linéaire, il s'agit d'un effet pépité pur. Ceci est le cas d'une distribution parfaitement randomisée (absence de dépendance spatiale).



**Figure 5.2.** Exemple de semi-variogramme (Baillargeon, 2005).

Après la réalisation des semi-variogrammes, des cartes de krigeage ont été produites en utilisant le logiciel GS+. Le Krigeage est une méthode optimale d'interpolation spatiale qui se sert des propriétés du semi-variogramme et des données du paramètre étudié. Dans le cadre de cette étude il s'agit des résidus des moyennes de Nles, Nlesm et Pom après analyse de variance.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 Comparaison des sévérités de la maladie par type d'ombrage

La comparaison est présentée par site ; les types d'ombrage sont comparés en fonction des 3 variables retenues Nles (nombre moyen de lésion sur feuille/fruit), Nlesm (nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade) et Pom (pourcentage d'organes malades).

#### 5.2.1.1 Site de Bokito

- *Sur feuilles*

Pendant les 4 dates d'observation, le nombre moyen de lésions par feuille (Nles), le nombre moyen de lésions par feuilles malades (Nlesm) et le pourcentage de feuilles malades (Pom) sur les arbres situés en plein soleil est toujours supérieur à celui des arbres situés à l'ombre des forestiers (Tableau 5.1). Toutefois, les différences ne sont pas significatives pour Nles. Pour Nlesm, les différences sont significatives pour les dates 2 et 3. S'agissant de Pom, elles le sont pour la date 3. On ne note aucune attaque sur feuilles pour les arbres situés à l'ombre des forestiers. Les moyennes des paramètres de la maladie sur les arbres situés à l'ombre des forestiers sont toujours de 0. Par contre, celles des arbres en plein soleil sont toujours >0. Dans l'ensemble de la parcelle, on note une intensité de maladie assez faible pour tous les arbres. Le Nles et le Nlesm sont presque toujours <1. Le Pom est presque toujours <10%.

**Tableau 5.1.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de mandariniers par type d'ombrage pour 4 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

Serie d'observation	Type d'ombrage	Nles	Nlesm	Pom (%)
1	Plein soleil	0.11±0.21a	1.50±2.05a	3.12±6.19a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00 ±0.00a	0.00±0.00a
2	Plein soleil	0.08±0.15a	0.96±0.45a	6.70±10.57a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00±0.00b	0.0±0.00a
3	Plein soleil	0.53±0.61a	1.58±1.40 a	22.44±21.77a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00±0.00b	0.00±0.00b
4	Plein soleil	0.03±0.06a	0.36±0.62a	2.40±4.65a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a

Moyennes ± écarts types; Nles = nombre moyen de lésion par feuille; Nlesm = nombre moyen de lésion par feuille malade; Pom = pourcentage de feuilles malades. Séparation des moyennes par le test Student-Newman-Keuls à p = 0.05. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

- *Sur fruits*

Pendant les 3 dates d'observation, le Nles, le Nlesm et le Pom sur les arbres situés en plein soleil sont toujours supérieurs à ceux des arbres situés à l'ombre des forestiers (Tableau 5.2). Toutefois, les différences ne sont pas significatives. Contrairement au constat fait sur feuille, on note la présence de la maladie sur des arbres situés à l'ombre des forestiers. A la date 3, les



moyennes des variables de la maladie sont  $>0$ . Les trois variables de la maladie présentent les mêmes tendances sur feuilles que sur fruits.

**Tableau 5.2.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur fruits de mandariniers par type d'ombrage pour 3 dates d'observation dans la parcelle de Bokito.

Date d'observation	Type d'ombrage	Nles	Nlesm	Pom (%)
<b>2</b>	Plein soleil	0.02±0.05a	0.19±0.50 a	1.34±3.54a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.0±0.00a
<b>3</b>	Plein soleil	0.80±1.60a	1.46±2.30a	23.47±26.18a
	Ombrage forestier	0.01±0.03a	0.25±0.61a	0.83±2.04a
<b>4</b>	Plein soleil	0.07±0.17_a	0.14±0.37a	6.59±17.44a
	Ombrage forestier	0.00±0.00a	0.00±0.00a	0.00±0.00a

Moyennes  $\pm$  écarts types ; Nles = nombre moyen de lésion par fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par fruit malade; Pom = pourcentage de fruits malades. Séparation des moyennes par le test Student-Newman-Keuls à  $p = 0.05$  ; Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

### 5.2.1.2 Site de Foumbot

Les observations à Foumbot sont faites uniquement sur feuilles car les plants n'étaient pas assez grands pour avoir des fruits. Le Nles le plus élevé (1.14) est situé dans la parcelle plein soleil, il en est de même pour le Nlesm le plus élevé (2.13) et le Pom (45.26%). Pendant les 2 dates d'observation, le Nles, le Nlesm et le Pom sur les arbres situés en plein soleil est toujours supérieur à celui des arbres situés à l'ombre (Tableau 5.3). En ce qui concerne le Nles et le Pom, les différences sont significatives pendant les 2 dates d'observation pour les 3 types d'ombrage. Le Nlesm affiche des différences significatives pendant la deuxième série uniquement. La sévérité de la maladie sur les arbres situés sous ombrage manguiers est toujours inférieure à celle des arbres situés sous ombrage avocatiers. Ces différences sont significatives uniquement à la date 1. Pendant les deux dates, la sévérité et l'incidence de la maladie sur les arbres situés en plein soleil est toujours supérieure à celle des arbres situés sous ombrage. Les écarts types sont assez élevés et souvent proches des moyennes. Les écarts types les plus élevés se retrouvent sur les arbres situés en plein soleil.

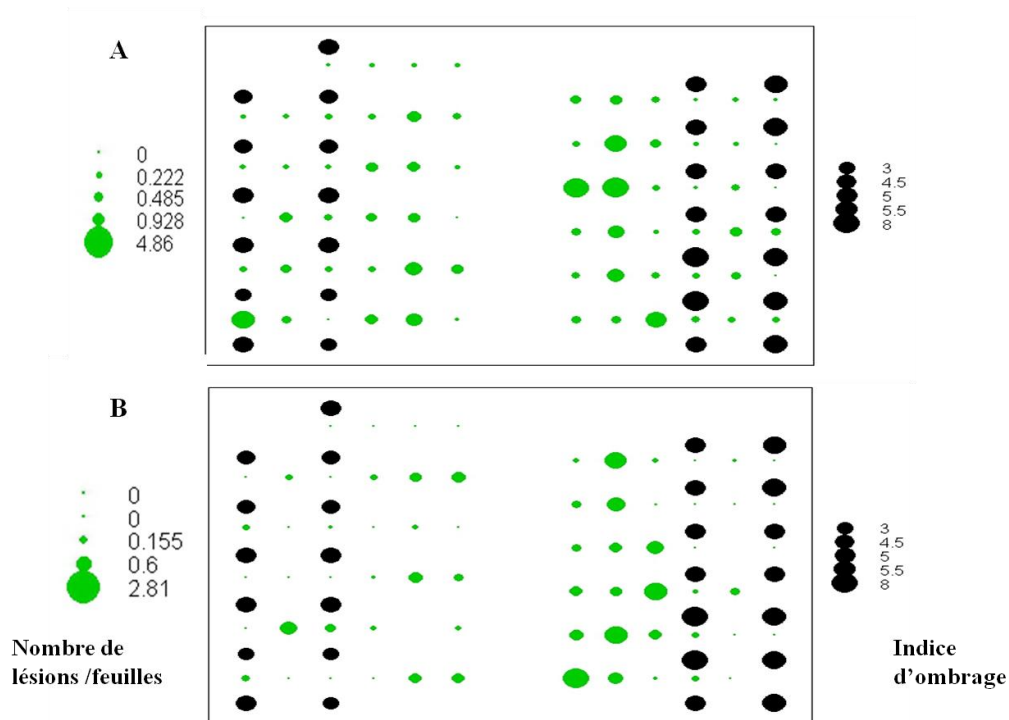
**Tableau 5.3.** Comparaison des sévérités de phaeoramulariose sur feuilles de pomélos par type d'ombrage pour 2 dates d'observation dans la parcelle de Foumbot.

Date d'observation	Type d'ombrage	Nles	Nlesm	Pom (%)
<b>1</b>	Plein soleil	1.14±1.15a	2.13±1.15a	45.26±23.92a
	Ombrage avocats	0.36±0.28ab	1.56±0.61a	21.39±13.70b
	Ombrage manguiers	0.62±0.83b	1.85±1.61a	27.76±14.33b
<b>2</b>	Plein soleil	0.64±0.71a	2.00±1.48a	25.20±23.05a
	Ombrage avocats	0.07±0.12b	0.56±1.20b	3.02 ± 5.54b
	Ombrage manguiers	0.16±0.31b	1.14±1.10b	8.11± 13.80b

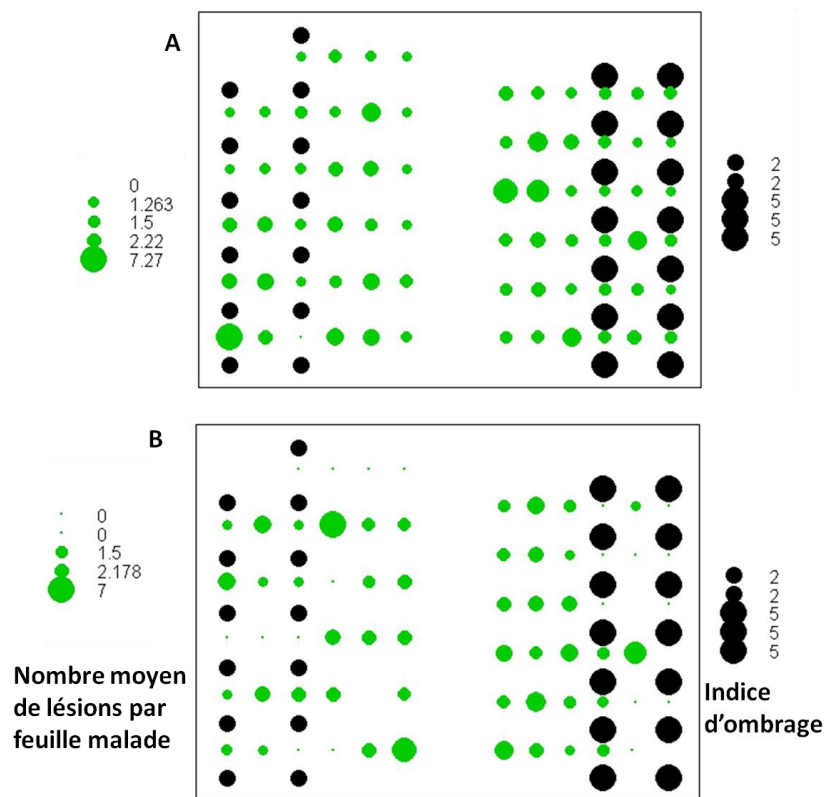
Moyennes ± écarts types ; Nles = nombre moyen de lésion par fruit; Nlesm = nombre moyen de lésion par fruit malade; Pom = pourcentage de fruits malades. Séparation des moyennes par le test Student-Newman-Keuls à  $p = 0.05$  ; Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes

### 5.2.2 Représentation graphique des variables de sévérité de la maladie par type d'ombrage

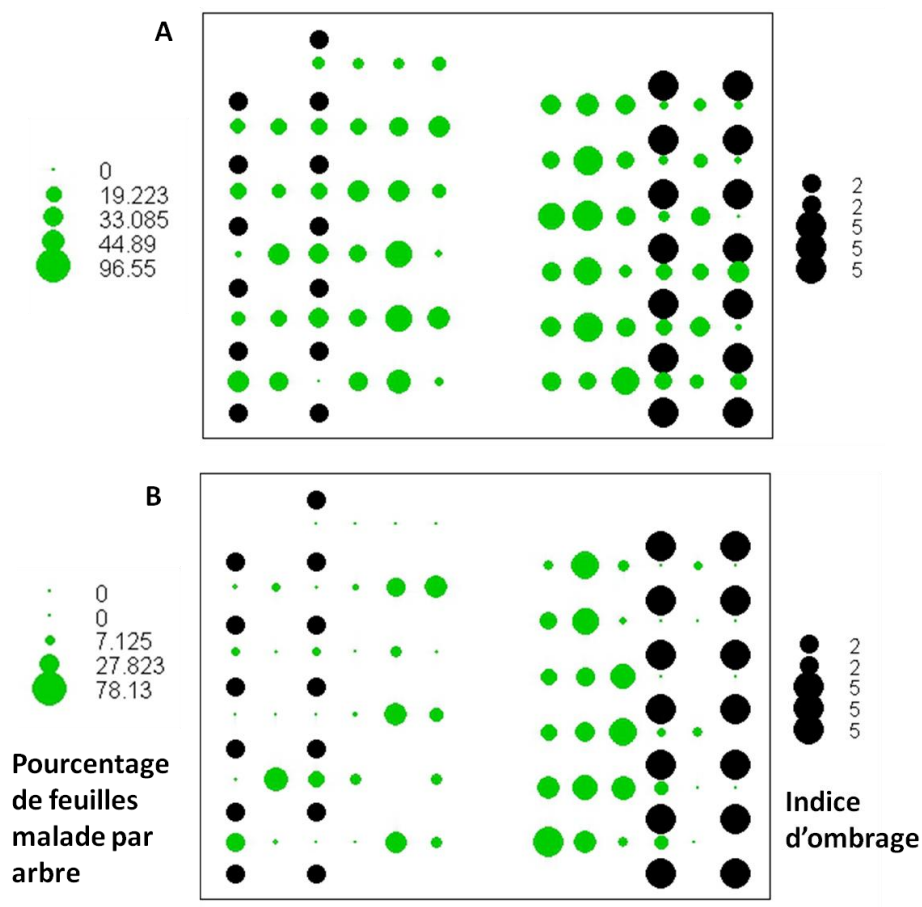
La représentation graphique a permis d'illustrer les résultats de l'analyse de variance. On note que les bulles représentant le Nles sont plus grandes pour les plants situés en plein soleil (Figure 5.3). Toutefois, on observe une grande variabilité pour ce type de plants. Certains plants présentent une bulle minuscule (pas de lésions), tandis que d'autres présentent les bulles les plus grandes (maximum de lésions). La situation est plus stable pour les plants situés à l'ombre. La plupart des bulles représentant ces plantes sont très réduites (peu de lésions) et presque identiques (variabilité réduite). Néanmoins, on observe que le degré de stabilité est corrélé à l'indice d'ombrage. Les arbres situés sous un fort indice d'ombrage, c'est-à-dire sous les manguiers ont sensiblement le même Nles. Par contre, il y a de légères variations parmi ceux situés sous un indice d'ombrage moyen c'est-à-dire sous avocats. Ce constat est valable pour les variables Nlesm (Figure 5.4) et Pom (Figure 5.5).



**Figure 5.3.** Représentation graphique du nombre moyen de lésions par feuille pour chaque plant de pomélo et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2<sup>ème</sup> date (B) dans la parcelle de Foubot.



**Figure 5.4.** Représentation graphique du nombre moyen de lésions par feuille malade pour chaque plant de pomélo et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2<sup>ème</sup> date (B) dans la parcelle de Foubot.



**Figure 5.5.** Représentation graphique du pourcentage de feuilles malades pour chaque plant de pomélo et des indices d'ombrage des différents arbres d'ombrage pendant la première date d'observation (A) et la 2<sup>ème</sup> date (B) dans la parcelle de Foubot.

### 5.2.3 Analyse de l'effet de l'ombrage et de la date d'observation sur l'intensité de la phaeoramulariose dans la parcelle

L'analyse de variance a permis de mettre en évidence l'effet de l'ombrage et de la date d'observation sur l'intensité de la maladie (Tableau 5.4). L'ombrage et la date d'observation influent significativement sur le Nles et le Pom. L'interaction des deux paramètres n'a pas d'effet significatif sur la maladie. S'agissant du Nlesm, seul le type d'ombrage a une influence significative sur cette variable. Sur toutes les variables de la maladie, l'effet de l'ombrage est plus significatif que celui de la date d'observation.

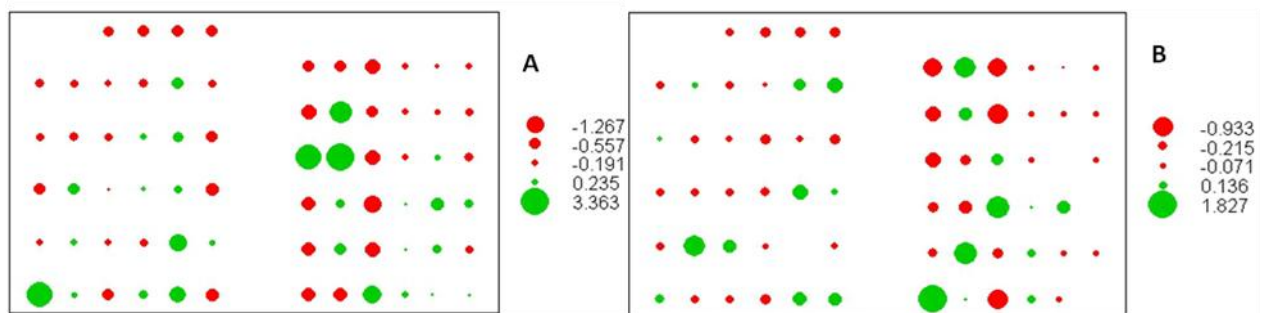
**Tableau 5.4.** Paramètres significativement associés à la sévérité de la phaeoramulariose dans la parcelle de Foubot.

Variable	Paramètres	Degré de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Pr (>F)
Nles	ombrage	3	20.8	6.9	12.9	$2.0 \cdot 10^{-07}***$
	date d'observation	1	6.6	6.6	12.2	$0.6 \cdot 10^{-3}***$
	ombrage x date	3	0.3	0.1	0.2	0.9
	résidus	128	68.7	0.5	-	-
Nlesm	ombrage	3	25.0	8.3	5.2	$0.2 \cdot 10^{-2}**$
	date d'observation	1	5.9	5.9	3.7	0.06
	ombrage x date	-	-	-	-	-
	résidus	131	208.2	1.6	-	-
Pom	ombrage	3	21292	7097.3	23.1	$4.5 \cdot 10^{-12}***$
	date d'observation	1	12493	12493.4	40.7	$2.8 \cdot 10^{-09}***$
	ombrage x date	-	-	-	-	-
	résidus	131	40238	307.2	-	-

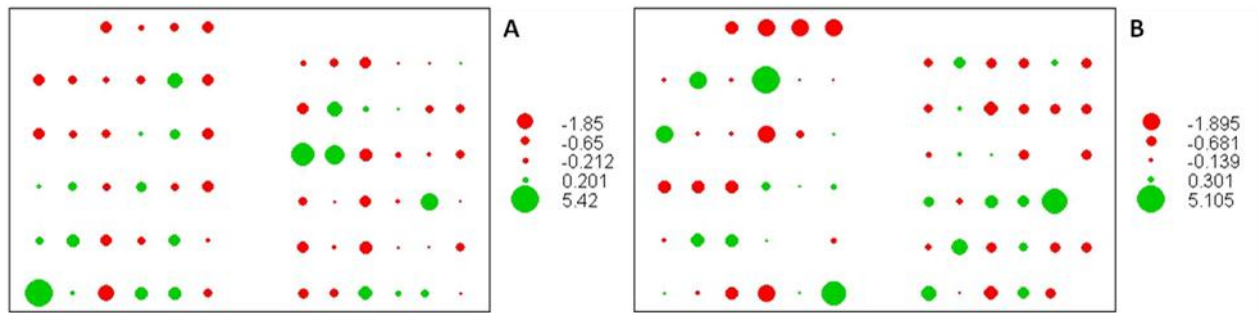
Codes significatifs: '\*\*\*'  $\approx 0$  ; '\*\*'  $\approx 0.001$  '\*'  $\approx 0.01$  '.'  $\approx 0.05$

#### 5.2.4 Représentation graphique des résidus après analyse des variances

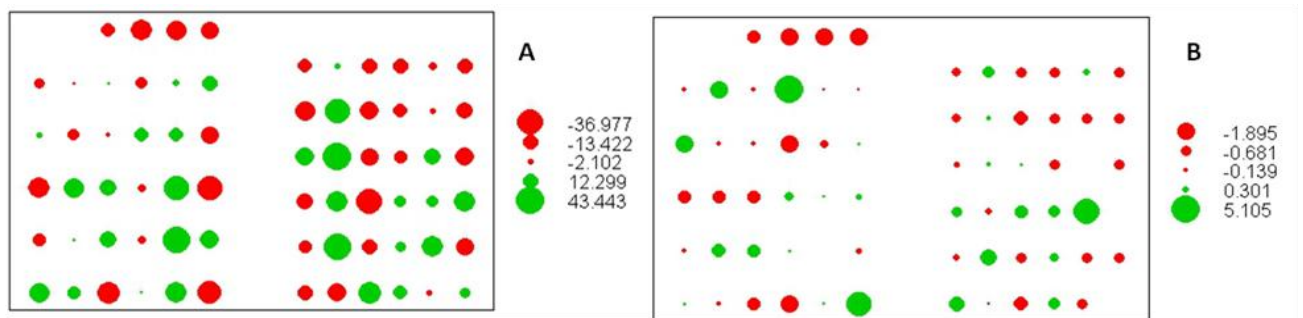
Après cette dernière analyse de variance, les résidus des moyennes de Nles, Nlesm, et Pom ont été cartographiés. La représentation graphique de ces résidus montre une grande variabilité au niveau des arbres situés en plein soleil tant sur les résidus du nombre moyen de lésions par feuille (Figure 5.6) ; du nombre moyen de lésions par feuille malade (Figure 5.7) ou du pourcentage de feuilles malades (Figure 5.8). La taille des bulles est corrélée à la moyenne des résidus. Plus la moyenne des résidus est grande, plus la bulle est grande. La couleur rouge illustre les résidus négatifs. On se rend en effet compte que les bulles des plants situés en plein soleil ont des tailles plus grandes et plus variées.



**Figure 5.6.** Représentation graphique des résidus du nombre moyen de lésions par feuille pour chaque plant de pomélo (Nles) pendant la première date d'observation (A) et la 2<sup>ème</sup> date (B) dans la parcelle de Foubot.



**Figure 5.7.** Représentation graphique des résidus du nombre moyen de lésions par feuille malade pour chaque plant de pomélo ( Nlesm) pendant la première date d'observation (A) et la 2ème date (B) dans la parcelle de Foubot.

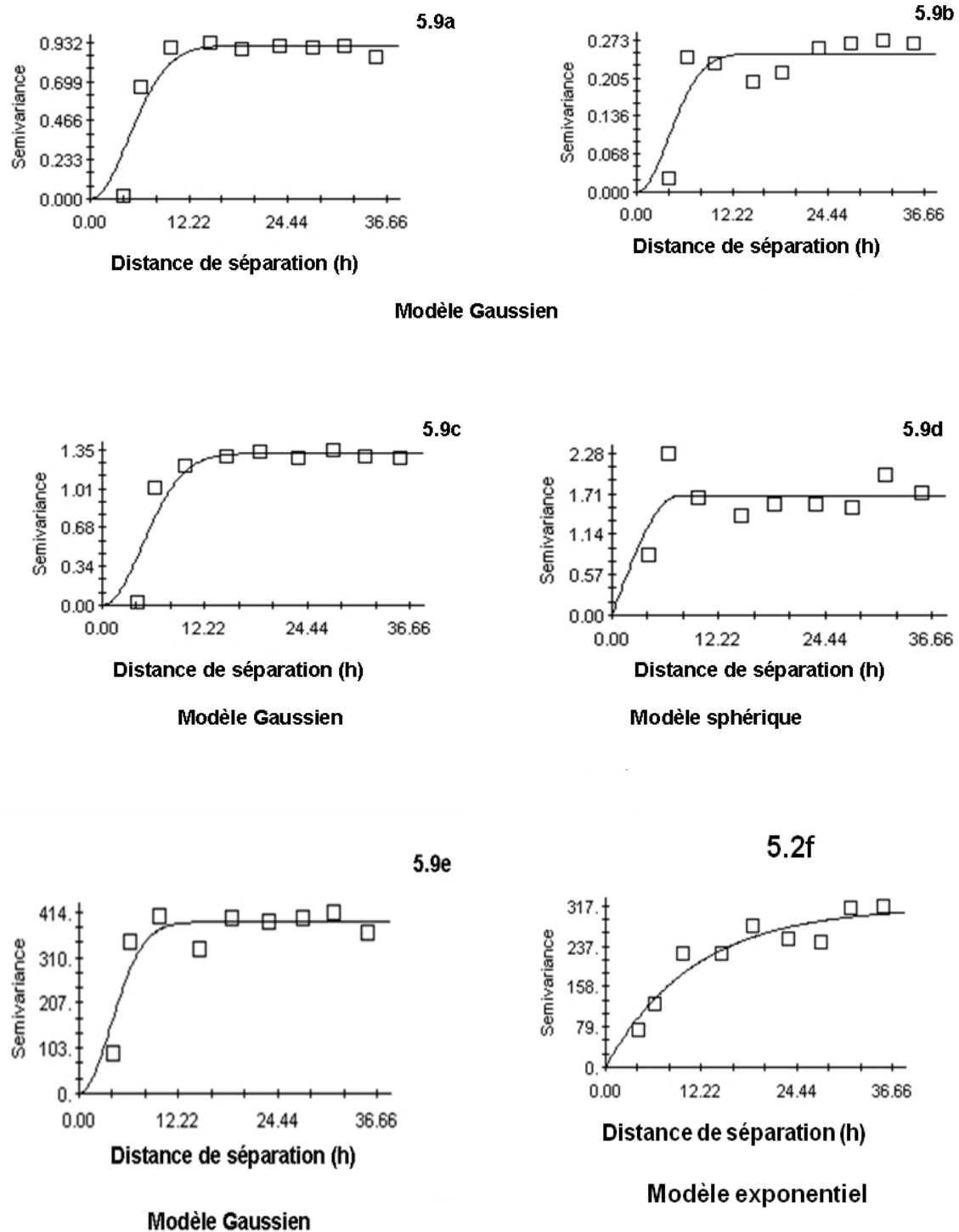


**Figure 5.8.** Représentation graphique des résidus du pourcentage de feuilles malades pour chaque plant de pomélo(Pom) pendant la première date d'observation (A) et la 2<sup>ème</sup> date (B) dans la parcelle de Foubot.

### 5.2.5 Analyse spatiale des résidus

La répartition des résidus suit toujours un modèle spatial. Les semi-variogrammes suivent un modèle Gaussien, sphérique ou exponentiel (Figure 5.9). Les modèles théoriques correspondent aux semi-variogrammes observés. Pour toutes les variables, nous avons  $r^2 < 1$ . Aucun modèle ne présente d'effet pépité, car le ratio  $C / (C_0 + C)$  est toujours sensiblement égal à 1 pour tous les modèles. La portée maximale est de 11.79 m et la minimale 7.49 m. En général, la portée à la date 1 est supérieure à celle de la date 2 (Tableau 5.4).

L'observation des cartes de krigeage (Figure 5.5) permet de relever une grande variabilité de distribution spatiale des résidus. Pour toutes les variables, des agrégats de niveau de maladie se forment dans la parcelle.



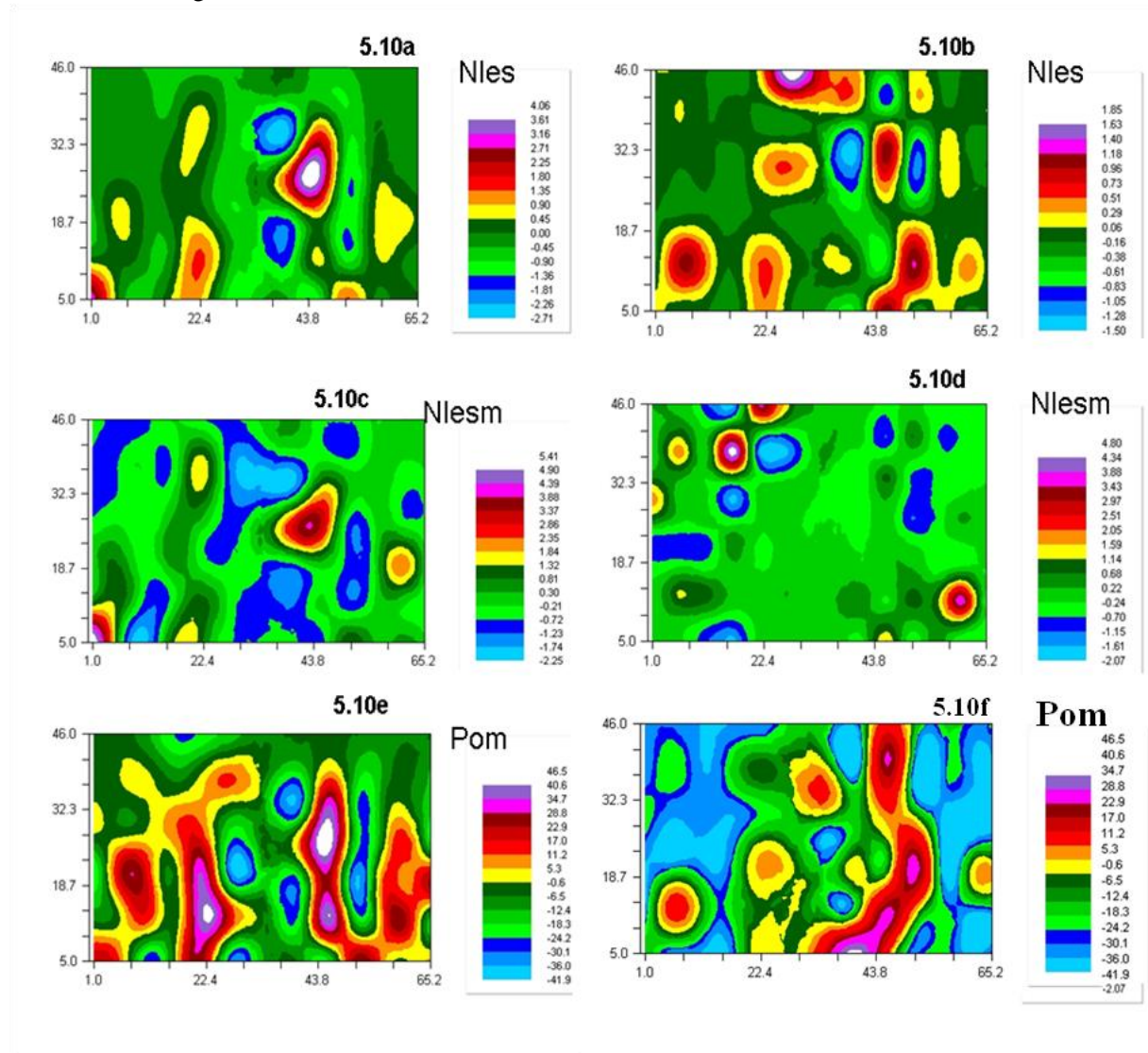
**Figure 5.9.** Semi-variances observées (carrés) et modèles correspondants (courbes) pour les résidus du nombre moyen de lésions par feuille par plant à la date1(a), date2 (b) ; du nombre moyen de lésions par feuille par feuille malade à la date1 (c) et la date 2 (d) et du pourcentage de feuilles malades à la date 1 (e) et la date 2 (f) sur plants de pomélo dans la parcelle de Foubot.



**Tableau 5.5.** Paramètres descriptifs des semi-variogrammes et statistiques des modèles obtenus pour les résidus des variables de la phaeoramulariose sur plants de pomélo pendant les deux dates d'observation dans la parcelle de Foubot.

Variable	Date	Modèle	Portée (A) en m	Palier (Co+C)	C/(Co+C)	RSS	R <sup>2</sup>
Nles	1	Gaussien	11.70	0.914	0.999	0.106	0.883
	2	Gaussien	10.08	0.249	1.000	0.015	0.704
Nlesm	1	Gaussien	11.76	1.323	0.999	0.227	0.870
	2	Sphérique	7.49	1.677	0.999	0.808	0.425
Pom	1	Gaussien	9.59	391.10	0.997	15660	0.829
	2	Exponentiel	7.49	314.60	0.999	5593	0.425

Nles : nombre moyen de lésions par feuille ; Nlesm : nombre moyen de lésions par feuille malade ;  
Pom : Pourcentage de feuilles malades



**Figure 5.10.** Cartes de Krigeage pour la distribution spatiale des résidus du nombre moyen de lésions par feuille par plant à la date1(a), date2 (b) ; du nombre moyen de lésions par feuille par feuille malade à la date1 (c) et la date 2 (d) et du pourcentage de feuilles malades à la date 1 (e) et la date 2 (f) sur plants de pomélo dans la parcelle de Foubot.



## **5.3 Discussions**

### **5.3.1 Effet de l'ombrage**

L'ombrage évalué dans cette étude semble bien avoir un effet sur le développement de la maladie. L'incidence et la sévérité de la maladie sont plus élevées sur les arbres situés en plein soleil que sur ceux situés sous ombrage quel que soit le système de production. L'effet de l'ombrage sur la phaeoramulariose des agrumes est mal connu. Cependant l'effet de l'ombrage a été étudié sur plusieurs couples plantes/bioagresseurs (Beer *et al* 1998, Mouen *et al*, 2007 ; Babin *et al*, 2011). Dans certaines d'entre elles, l'ombrage permet de diminuer le niveau d'attaque du bioagresseur, dans d'autres, par contre, il favorise son développement. Le rôle de l'ombrage diffère donc en fonction des pathosystèmes considérés et dans notre cas, son effet semble positif, c'est-à-dire qu'il réduit la sévérité de la maladie.

L'effet de l'ombrage a été hautement significatif sur toutes les variables et pendant les 2 dates d'observation dans la parcelle de Foubot. A Bokito, bien que visible, l'effet de l'ombrage n'a pas été significatif à toutes les dates ni pour toutes les variables. Il a été significatif pendant 2 séries d'observation sur 4 et pour 2 des trois variables calculées. A Bokito l'incidence et la sévérité de la maladie étaient faibles sur tous les arbres. Ceci peut expliquer le faible niveau de significativité des différences observées. En outre, il s'agit d'un système agroforestier dans lequel plusieurs autres facteurs doivent être pris en considération, notamment la présence des autres espèces d'arbres associées. Les arbres associés aux agrumes peuvent jouer le même rôle que les arbres d'ombrage. Ces arbres peuvent parfois agir comme des barrières et réduire la progression de la maladie (de Vallavieille-Pope *et al*, 2004 ; Wolfe, 2000). L'évaluation de l'effet de l'ombrage est difficile dans ce genre de système.

Dans la parcelle de Foubot, plus l'indice d'ombrage est élevé (sous manguiers), plus la sévérité de la maladie est faible. Lorsque l'intensité de l'ombrage est moins élevée (sous les avocats), les différences de sévérité entre les arbres situés sous ombrage et ceux situés en plein soleil ne sont pas significatives. Ces résultats suggèrent que l'ombrage doit être suffisant pour réduire de façon significative l'incidence de la maladie. Autrement un ombrage trop léger n'aura que peu d'effets significatifs sur le développement de la maladie. La plante devant par ailleurs recevoir une quantité suffisante de rayonnement pour une bonne croissance, il est donc nécessaire de déterminer un optimum permettant un bon compromis entre croissance de la plante et réduction de la sévérité de la maladie. Cet optimum peut varier en fonction des conditions climatiques et sanitaires des plantations considérées.

Les analyses de variance montrent une différence de sévérité de la maladie entre les arbres placés sous avocats et les arbres plantés sous manguiers. Ce constat se dégage également des graphiques à bulles représentant les différentes variables de sévérité de la phaeoramulariose. Ceci nous amène à penser que l'intensité de la lumière peut jouer un rôle sur le développement de la maladie. En effet, le rôle de barrière est sensiblement similaire pour les avocats et les manguiers car les dispositions sont les mêmes vis-à-vis des plants de pomélos. La différence est constatée au niveau de la canopée et de l'indice d'ombrage. Il apparaît donc important pour des études ultérieures de tester le rôle de l'intensité de la lumière.

### **5.3.2 Distribution spatiale de la phaeoramulariose**

La différence de sévérité de la maladie sur les plants de pomélos dans la parcelle de Foubot est expliquée par la présence des arbres d'ombrage. Les dates d'observation différentes influent également sur les différentes variables. Ces deux paramètres ont un effet significatif sur la sévérité de la maladie. L'interaction entre les 2 paramètres n'a aucun effet significatif. Cependant, la sévérité de la maladie ne s'explique pas entièrement par l'ombrage et la date d'observation. Il est donc apparu judicieux de procéder à une analyse spatiale des résidus.

La représentation graphique des résidus sur des cartes à bulles permet d'observer une grande variabilité, surtout au niveau des arbres situés en plein soleil. En plein soleil, une part de la variabilité n'est pas expliquée par le modèle ombrage-date. Cette part de variabilité peut être expliquée par la distribution spatiale de la maladie. Ceci nous amène à penser que les arbres d'ombrage peuvent modifier la distribution spatiale de la maladie.

La plupart des semi-variogrammes ont une portée inférieure à 12 m, ce qui signifie que les éloignés de plus de 12 m n'ont plus d'influence les uns sur les autres. La plupart des semi-variogrammes obtenus n'ont pas d'effet pépète, ceci dénote d'une forte ressemblance des données à petite échelle (des plants voisins ont souvent le même niveau de maladie). (Baillargeon, 2005). Ceci s'observe également sur les cartes de Krigeage où l'on constate des agrégats de niveau des résidus.

Les conidies de *P. angolensis* sont disséminées à courte distance par le vent et la pluie (Seif & Hillocks, 1998 ; Yesuf, 2002). Ce mode de dissémination peut expliquer la structure spatiale agrégée de la maladie. La maladie se propage ainsi d'un arbre à ses plus proches voisins en fonction de la vitesse du vent et de l'intensité de la pluie. Cependant le développement de l'infection va dépendre de la présence et de la qualité de l'hôte. Dans le cas où les arbres voisins sont des hôtes sensibles, l'infection est favorisée et le cycle épidémiologique se poursuit. Par contre, si les voisins sont peu sensibles ou s'il ne s'agit pas de plantes hôtes comme (cas d'une parcelle agroforestière), l'évolution de l'épidémie peut être circonscrite ou ralentie.

Cette étude nous a donc permis de mettre en évidence le rôle des arbres d'ombrage qui peuvent constituer des barrières physiques pour l'évolution de la maladie et également créer des microclimats néfastes à l'évolution du champignon.

## ***Chapitre 6 :***

### ***Elaboration d'un modèle de prédiction pour la gestion du risque***



## **Chapitre 6 : Elaboration d'un modèle de prédiction pour la gestion du risque**

### **6.1 Introduction**

La principale méthode de lutte utilisée contre la phaeoramulariose des agrumes au Cameroun et dans les zones où sévit cette maladie est en général la lutte chimique. Les doses et le nombre de traitements recommandés sont uniformisés. Cependant, on constate une variation de la sévérité et de l'incidence de la maladie au sein des bassins de production, des sites et des plantations (Chapitres 3, 4 et 5). Ces variations mettent en évidence l'influence des facteurs liés à l'espèce/variété, au climat, au type de sol ou au système de production sur le développement de la maladie.

Seif et Hillocks en 1996, à travers une analyse de régression, ont développé plusieurs modèles prédictifs de l'incidence de la phaeoramulariose des agrumes. Cette analyse ne prenait en considération que les facteurs climatiques (pluviométrie, température, humidité relative, vitesse du vent...). En outre, parmi les modèles obtenus, certains ont été invalidés à cause des fortes colinéarités existant entre les différentes variables. Les autres modèles retenus présentaient des coefficients de régression relativement faibles, ce qui laisse supposer que d'autres facteurs ayant une influence sur le développement de la maladie seraient à prendre en compte.

L'objectif de cette étude est de construire à l'aide d'une analyse de régression des modèles de prédiction de l'incidence de la phaeoramulariose pour la gestion du risque épidémiologique sur trois variétés d'agrumes. La régression PLS (Partial least squares) ou régression par les moindres carrés partiels a été utilisée dans cette étude. C'est une méthode qui s'est principalement développée dans le domaine de la chimie mais qui est de plus en plus utilisée pour l'analyse des données biologiques, lorsque le nombre de régresseurs pris en compte est important (Tenenhaus, 1998 ; Johansson & Nilsson, 2002).

### **6.2 Matériel et Méthodes**

#### **6.2.1 Acquisition des données**

Cette analyse utilise les moyennes des différents paramètres de climat et du sol sur les 8 sites (Bokito, Boumnyebel, Ekona, Foubot, Jakiri, Kumba, Njombé et Nkolbisson) selon la méthodologie exposée au Chapitre 4. S'agissant du système de production, il s'agit des pourcentages qui représentent le pourcentage d'arbres situés dans un système agroforestier ou dans un verger pur.

Les moyennes par variété des 3 variables de maladie (Nles, Nlesm, Pom) ont été calculées sur les 4 dates. Ce calcul a permis d'avoir pour chaque site une moyenne par variable et par variété, de sorte d'avoir un tableau par variété, présentant les sites et leurs caractéristiques (intensité de maladie, altitude, climat, sol, système de production). Il s'agit de savoir pour

chaque variété, comment évolue la maladie en fonction des paramètres des sites. Cette analyse a été effectuée uniquement avec les données sur feuilles, étant donné qu'elles sont plus complètes (4 dates) et qu'elles suivent les mêmes tendances que les données sur fruits. L'analyse a été effectuée sur les 3 variétés les mieux représentées dans les sites (orangers, pomélos et Satsumas).

### 6.2.2 Analyse de Régression PLS

Plusieurs des variables explicatives utilisées sont corrélées entre elles. Nous notons ainsi des corrélations supérieures à 80% entre l'altitude, la température et la pluviométrie moyennes. Il en est de même entre les paramètres du sol où nous retrouvons des corrélations avoisinant 70% (argile, sable et limon ; matière organique et carbone organique...). Cette forte colinéarité entre variables indépendantes a guidé notre choix vers la régression PLS. En effet une analyse de régression multiple « traditionnelle » aurait conduit à une estimation incertaine des paramètres de régression et à des modèles difficiles à interpréter (Johansson & Nilsson, 2002 ; Palomino & Carrascal, 2007 ; Olav *et al*, 2011). L'objectif de la régression PLS est de comprendre et décrire les relations complexes entre variables dépendantes (Y) et variables indépendantes (X) en l'absence d'un modèle théorique (Tenenhaus, 1998 ; Tenenhaus *et al*, 2005; Palomino & Carrascal, 2007). Elle est utilisée lorsque le nombre de variables X est très important par rapport aux variables Y ou de manière générale lorsque le nombre de variables indépendantes et/ou dépendantes est élevé (Tenenhaus *et al*, 1995 ; Tenenhaus, 1998). Dans le cadre de cette étude, il s'agit de décrire pour chaque variété les relations qui existent entre les variables de la maladie et les paramètres qui caractérisent les sites. La régression PLS a été effectuée avec le logiciel XLSTAT 2011.3.02. Les variables expliquées (Y) sont les variables de la maladie (Nles, Nlesm et Pom), soit 3 variables. Les variables explicatives (X) sont les paramètres du climat, du sol, l'altitude et le système de culture (pour lequel nous notons le pourcentage d'arbres situé dans un système agroforestier ou dans un verger pur), soit 22 variables. Cette analyse a été effectuée sur trois espèces/variétés (orangers, pomélos, mandariniers satsumas). Ces variétés sont celles qui sont présentes dans presque tous les sites et tous les systèmes de culture.

La Régression PLS débute par une analyse canonique qui génère des composantes ( $t_h$ ). La première composante  $t_1$  est construite comme combinaison linéaire des variables explicatives  $x_j$ . Cette combinaison linéaire cherche à regrouper les variable  $x_j$  et à expliquer au mieux la variable  $y$ . Lorsque le pouvoir explicatif de ces variables  $x_j$  est faible, une deuxième composante  $t_2$  est construite comme combinaison linéaire des  $x_j$  non corrélée à  $t_1$  et expliquant bien les résidus  $y_1$ . Les composantes sont représentées sur des axes. La construction du second axe permet d'extraire l'information qui n'apparaît pas dans la première composante  $t_1$ . Cette procédure peut se poursuivre en utilisant à chaque fois les résidus des  $y$ . Le nombre de composantes  $t_h$  est déterminé par une validation croisée. La validation croisée s'effectue avec des indices  $Q^2$  qui mesurent l'apport marginal de chaque composante PLS  $t_h$  au pouvoir prédictif du modèle. L'apport de la composante  $t_h$  est significatif si  $Q_h^2 \geq 0.0975$  ou si au moins un  $Q_{hk}^2 \geq 0.0975$ . Toutes les variables sont centrées-réduites pour avoir des données indépendantes de l'unité, les unités de mesures des variables climatiques et du sol étant très différentes. Deux autres mesures de validité du modèle sont générées : (i)  $R^2X$  qui est la proportion de la variance des variables indépendantes  $x$  expliquée par les composantes  $t_h$  dans le modèle ; (ii)  $R^2Y$  qui est la proportion de la variance la variable dépendante  $y$  expliquée par les composantes  $t_h$  dans le modèle. Ce dernier paramètre correspond au coefficient de corrélation multiple  $R^2$  (Johansson

& Nilsson, 2002 ; Tenenhaus *et al*, 2005). Les corrélations entre les différentes variables et les composantes guident également le choix des composantes. Plus les corrélations sont fortes, mieux les variables sont représentées dans le modèle.

L'influence relative de chaque variable explicative dans le modèle peut être exprimée comme l'importance de la variable dans la projection (Variable Importance in the Projection) ou VIP. Les variables ayant un fort VIP ( $>0.8$ ) sont les plus importantes dans la construction de Y (Tenenhaus *et al*, 2005).

## 6.3 Résultats

### 6.3.1 Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des orangers

#### ○ Choix du nombre de composantes $t_h$ et leur degré d'explication des variables

Les résultats de la validation croisée permettent de retenir les composantes 1 et 2 pour expliquer les variables Nles, Nlesm et Pom. En effet,  $Q^2 \geq 0.0975$  (Tableau 6.1). Toutes les variables de la maladie peuvent être expliquées par le modèle car au niveau de la composante 2, tous les  $Q^2$  sont  $\geq 0.0975$ . La première composante ( $t_1$ ) explique 58% des x et 10% des y, tandis que la 2<sup>ème</sup> composante explique 11% des x et 73% des y (Tableau 6.2).

**Tableau 6. 1.** Indice de qualité du modèle ( $Q^2$ ) par composante et par variable expliquée sur orangers.

Composante	$Q^2$			
	Nles	Nlesm	Pom	Total
<b>1</b>	-21,676	-21,621	-23,382	<b>-22,226</b>
<b>2</b>	0,297	0,281	0,384	<b>0,321</b>
<b>3</b>	-0,192	-0,225	-0,281	<b>-0,232</b>

Lorsque nous nous intéressons aux corrélations entre les variables et leurs composantes  $t_h$ , on note que l'altitude et presque toutes les variables du sol ont de fortes corrélations négatives avec la composante  $t_1$ . La composante  $t_2$ , elle, a de fortes corrélations positives avec les variables de la maladie (Figure 6.1). Ces variables sont les mieux expliquées par les 2 composantes. On remarque que la pluviométrie et le taux de sodium (Na) sont mal représentés au centre du cercle de corrélation. Ces variables sont très faiblement corrélées aux deux composantes. Elles sont aussi très faiblement explicatives de la maladie car elles ont des  $R^2$  faibles sur les 2 composantes (Tableau 6.2). Le taux de saturation (V) est la variable la mieux expliquée sur la composante  $t_1$ . Lorsqu'on projette les sites d'observation dans le plan, on constate que les sites de Foubot, Nkolbisson, Ekona et Kumba sont plus proches des variables de la maladie. Ce sont les sites qui présentent les attaques les plus sévères (voir résultats Chapitre 4). Par contre les sites de Bokito et Njombé sont les plus éloignés des variables de la maladie. Ils présentent de faibles sévérités. Le site de Jakiri est placé en dehors

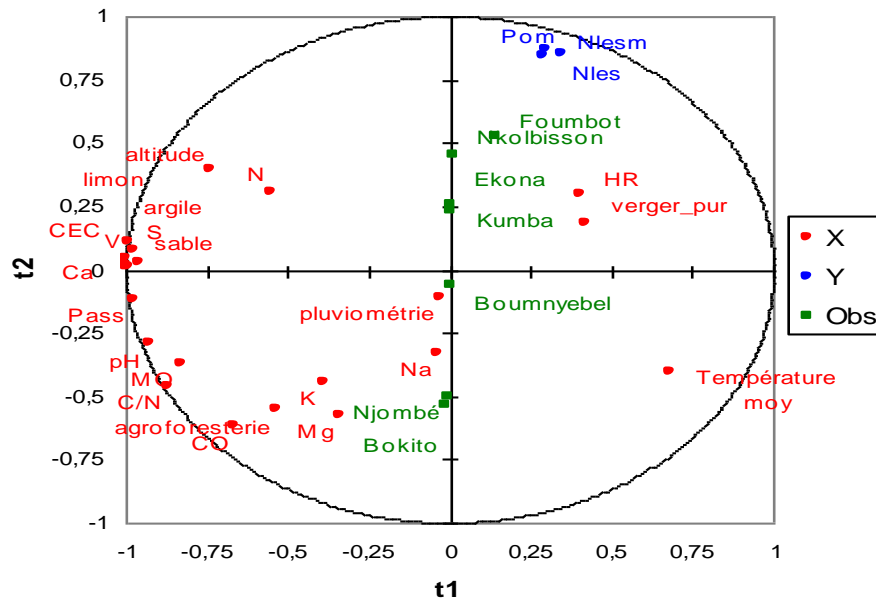
du plan, c'est un site extrême qui est situé à plus haute altitude, mais avec de faible sévérité de la maladie.

On note de fortes corrélations positives entre les variables du sol, le système agroforestier et les variables de la maladie. Les corrélations sont également positives entre moyenne et les variables de la maladie.

**Tableau 6. 2.** Pouvoir explicatif des composantes  $t_h$  du modèle de régression PLS sur orangers.

Variable x	R <sup>2</sup>	
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
altitude	0,545	0,156
HR	0,162	0,089
Température m.	0,461	0,161
pluviométrie	0,001	0,012
argile	0,991	0,012
limon	0,959	0,006
sable	0,986	0,000
MO	0,687	0,141
CO	0,446	0,377
N	0,305	0,093
C/N	0,755	0,210
Pass	0,954	0,014
K	0,153	0,198
pH	0,856	0,085
Ca	0,998	0,000
Mg	0,116	0,334
Na	0,001	0,111
S	0,998	0,000
CEC	0,922	0,001
V	1,000	0,002
agroforesterie	0,284	0,307
verger pur	0,179	0,034
<b>R<sup>2</sup>x</b>	<b>0,580</b>	<b>0,106</b>
Variable y	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
Nles	0,122	0,731
Nlesm	0,085	0,716
Pom	0,089	0,754
<b>R<sup>2</sup>y</b>	<b>0.099</b>	<b>0.733</b>

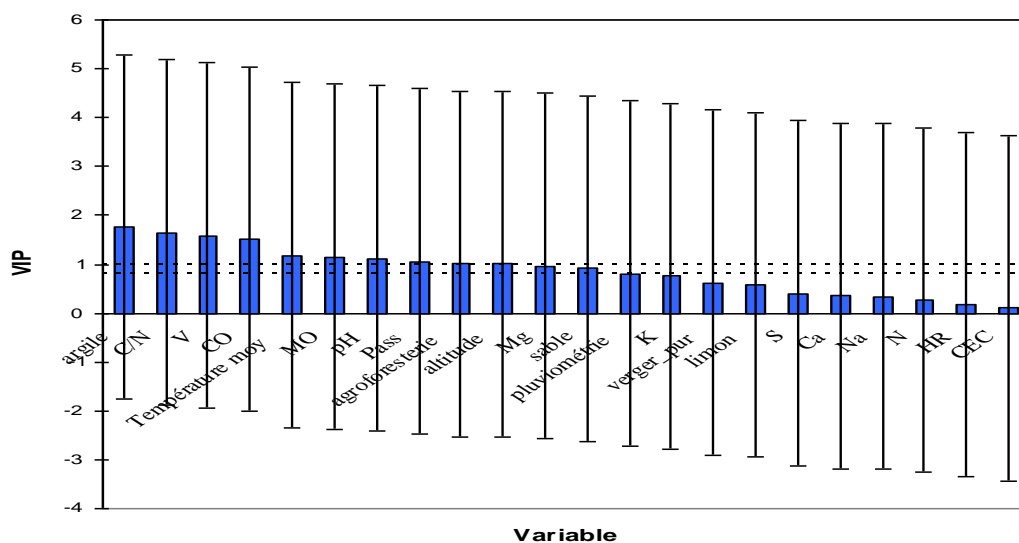




**Figure 6.1.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes  $t_1$  et  $t_2$  sur orangers.

#### ○ Importance des variables dans le modèle

Seulement 13 variables sur 22 entrent dans la construction du modèle avec un  $VIP > 0.8$  (Figure 6.2). Sur le graphe, elles vont par ordre d'importance du taux d'argile à la pluviosité. On note que la texture du sol, sa composition en matière organique, son pH sont importants, de même la température moyenne, l'altitude ainsi que le système agroforestier se retrouvent parmi les facteurs les plus importants.



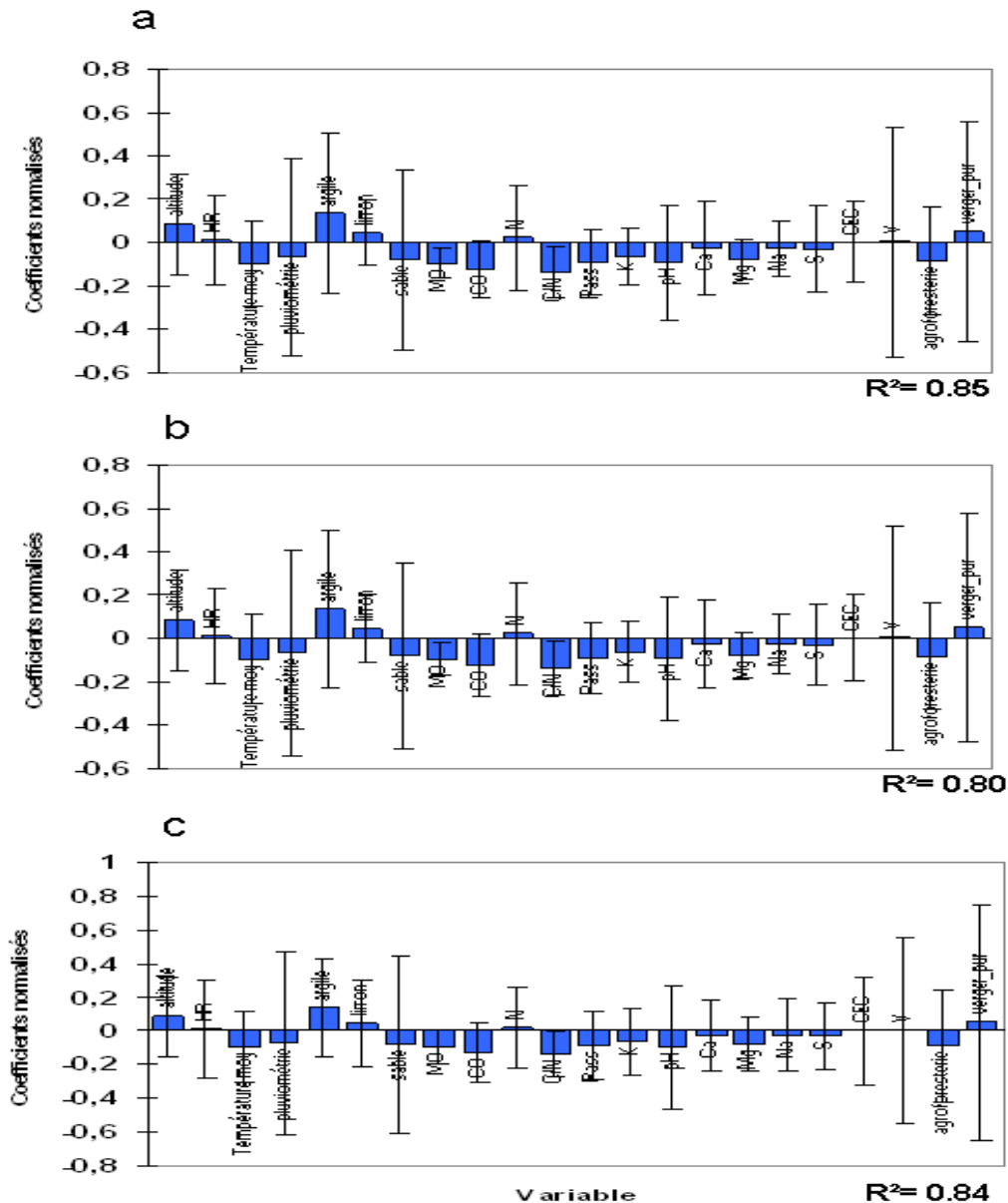
**Figure 6.2.** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur orangers (intervalle de confiance 95%).

○ *Paramètres du modèle de régression*

Pour chacune des variables de la maladie, les constantes et les coefficients de régression sont représentées dans le tableau 6.3. On constate que ces coefficients sont en majorité négatifs et donc de même signe que les corrélations. Certaines variables, qui ne sont pas très importantes dans le modèle, ont toutefois des coefficients de corrélation élevés (Na, N, K). Sur les données normalisées, l et VIP ont les plus forts coefficients de régression (Figure 6.3). Les coefficients de régression normalisés sont faibles ( $<0.2$ ). Les tendances sont les mêmes pour les trois variables de la maladie. Les coefficients de régression des variables C/N, argile, carbone organique (CO), matière organique (MO), pH, température, phosphore assimilable (Pass) et agroforesterie sont les plus élevés.

**Tableau 6.3.** Coefficients de régression des variables environnementales pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur oranger.

Variable	Coefficients de régression		
	Nles	Nlesm	Pom
Constante	8,099	12,647	86,259
Altitude	0,000	0,001	0,004
HR	0,008	0,012	0,081
Température	-0,100	-0,151	-1,006
Pluviométrie	0,000	-0,001	-0,004
Argile	0,034	0,052	0,346
Limon	0,019	0,029	0,193
Sable	-0,022	-0,034	-0,224
MO	-0,083	-0,125	-0,832
CO	-0,478	-0,722	-4,806
N	0,227	0,343	2,283
C/N	-0,003	-0,005	-0,035
Passimilable	-0,004	-0,007	-0,045
K	-0,185	-0,279	-1,858
pH	-0,310	-0,468	-3,116
Ca	-0,008	-0,012	-0,079
Mg	-0,515	-0,778	-5,183
Na	-15,028	-22,702	-151,168
S	-0,008	-0,013	-0,083
CEC	0,000	0,001	0,004
V	0,000	0,000	-2,166
Agroforesterie	-0,065	-0,098	-0,650
Verger pur	0,057	0,087	0,576



**Figure 6.3.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur oranges (intervalle de confiance à 95%).

A partir des constantes et des coefficients de régression nous pouvons écrire l'équation du modèle pour chacune des variables de la maladie. L'équation du modèle résume l'importance des différentes variables vis-à-vis de la phaeoramulariose. En ne prenant en considération que les VIP, l'équation de l'incidence de la maladie (Pom) a été obtenue avec les variables centrées réduites. Sur oranges, on a :

**Pom = 86,259 + 0,004 altitude - 1,006 température moyenne - 0,004 pluviométrie + 0,346 taux d'argile - 0,224 taux de sable - 0,832 taux de matière organique - 4,806 taux de Carbone organique - 0,035C/N - 0,045 phosphore assimilable - 3,116 pH - 5,183 taux magnésium - 2,166 taux de saturation du sol - 0,650 pourcentage d'arbres en système agroforestier**

### 6.3.2 Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des pomélos

#### ○ *Choix du nombre de composantes $t_h$ et leur degré d'explication des variables*

Les composantes 1 et 2 sont retenues pour expliquer les variables Nles, Nlesm et Pom. En effet, la validation croisée montre que  $Q^2 \geq 0.0975$  (Tableau 3.26). Toutes les variables de la maladie peuvent être expliquées par le modèle, car au niveau de la composante 2, tous les  $Q^2$  sont  $\geq 0.0975$ . La première composante ( $t_1$ ) explique 60% des x et 11% des y, tandis que la 2<sup>ème</sup> composante explique 9% des x et 81% des y (Tableau 6.4).

**Tableau 6.4.** Indice de qualité du modèle ( $Q^2$ ) par composante et par variable expliquée sur pomélos.

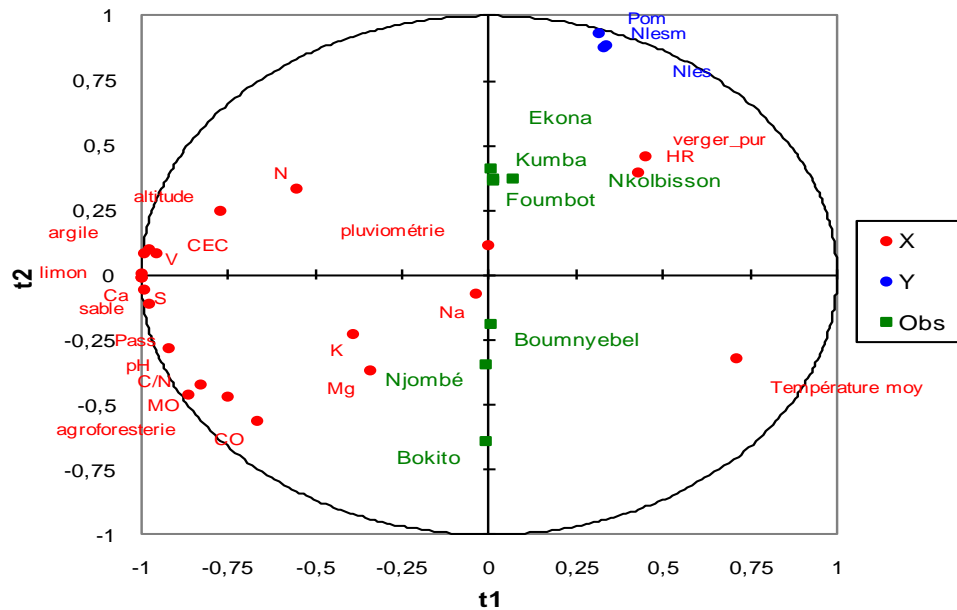
Composante	$Q^2$			
	Nles	Nlesm	Pom	Total
1	-31,726	-31,075	-35,983	-32,928
2	0,309	0,240	0,484	0,344
3	-0,091	-0,335	-0,052	-0,192

La pluviométrie et le taux de sodium sont placés au centre du cercle de corrélation (Figure 6.4). Elles sont très faiblement corrélées avec  $t_1$  et  $t_2$ , leur  $R^2$  sont également très faibles (Tableau 6.5). Ces variables sont donc faiblement explicatives de la maladie. Le taux de saturation (V) est la variable la mieux expliquée sur la composante  $t_1$ . On note des corrélations fortes et négatives entre la composante  $t_1$  et plusieurs variables de sol. Les corrélations sont fortes et positives entre la composante  $t_2$  et les variables de la maladie.

La projection des sites d'observation sur le plan formé par les deux composantes permet de noter que les sites de Foubot, Nkolbisson, Ekona et Kumba sont plus proches des variables de la maladie. Ce sont les sites qui présentent les attaques les plus sévères (voir résultats Chapitre 4). Par contre, les sites de Bokito et Njombé sont les plus éloignés des variables de la maladie. Le site de Jakiri est placé en dehors du plan. Ce site est extrême, il est situé à très haute altitude et présente de faibles sévérités de la maladie.

**Tableau 6.5.** Pouvoir explicatif des composantes  $t_h$  du modèle de régression PLS sur pomélos.

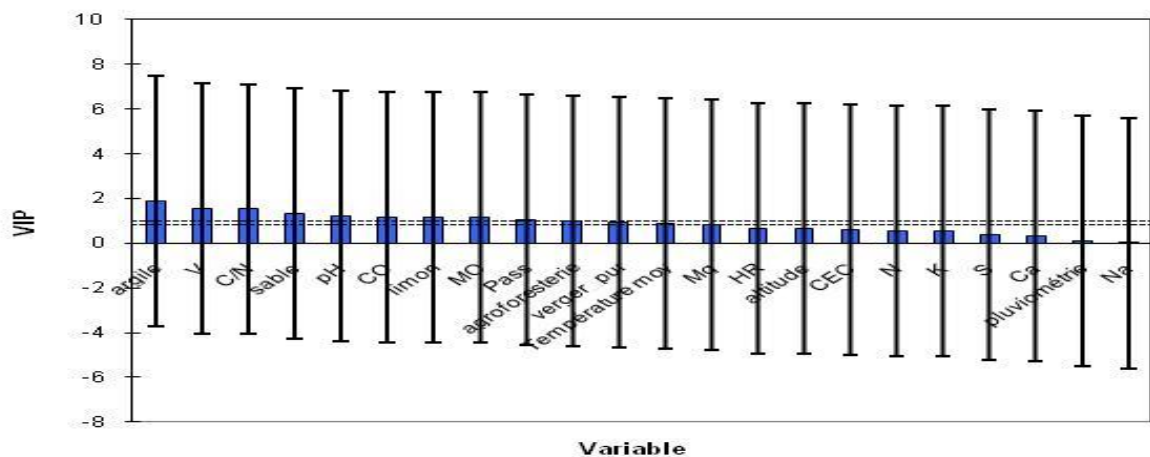
Variable x	R <sup>2</sup>	
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
altitude	0,597	0,061
HR	0,184	0,157
Température	0,505	0,104
pluviométrie	0,000	0,013
argile	0,991	0,007
limon	0,959	0,010
sable	0,986	0,003
MO	0,687	0,177
CO	0,446	0,313
N	0,305	0,112
C/N	0,754	0,211
Pass	0,953	0,012
K	0,153	0,050
pH	0,855	0,078
Ca	0,998	0,000
Mg	0,116	0,135
Na	0,001	0,006
S	0,997	0,000
CEC	0,921	0,007
V	1,000	0,000
agroforesterie	0,566	0,222
verger_pur	0,201	0,212
<b>R<sup>2</sup>x</b>	<b>0,599</b>	<b>0,086</b>
Variable y	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>
<b>Nles</b>	0,115	0,791
<b>Nlesm</b>	0,108	0,767
<b>Pom</b>	0,101	0,865
<b>R<sup>2</sup>y</b>	<b>0,108</b>	<b>0,808</b>



**Figure 6.4.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes  $t_1$  et  $t_2$  sur pomélos.

### ○ Importance des variables dans le modèle

Le nombre de variables les plus importantes qui entrent dans la construction du modèle ( $VIP > 0.8$ ) est 13 (Figure 6.5). Sur le graphe, elles vont par ordre d'importance du taux d'argile au taux de magnésium (Mg). On note que la texture du sol, sa composition en matière organique, son pH ainsi que le système de culture sont importants. Parmi les facteurs climatiques, seule la température moyenne se retrouve dans les VIP. L'altitude non plus ne se retrouve pas parmi les facteurs les plus importants.



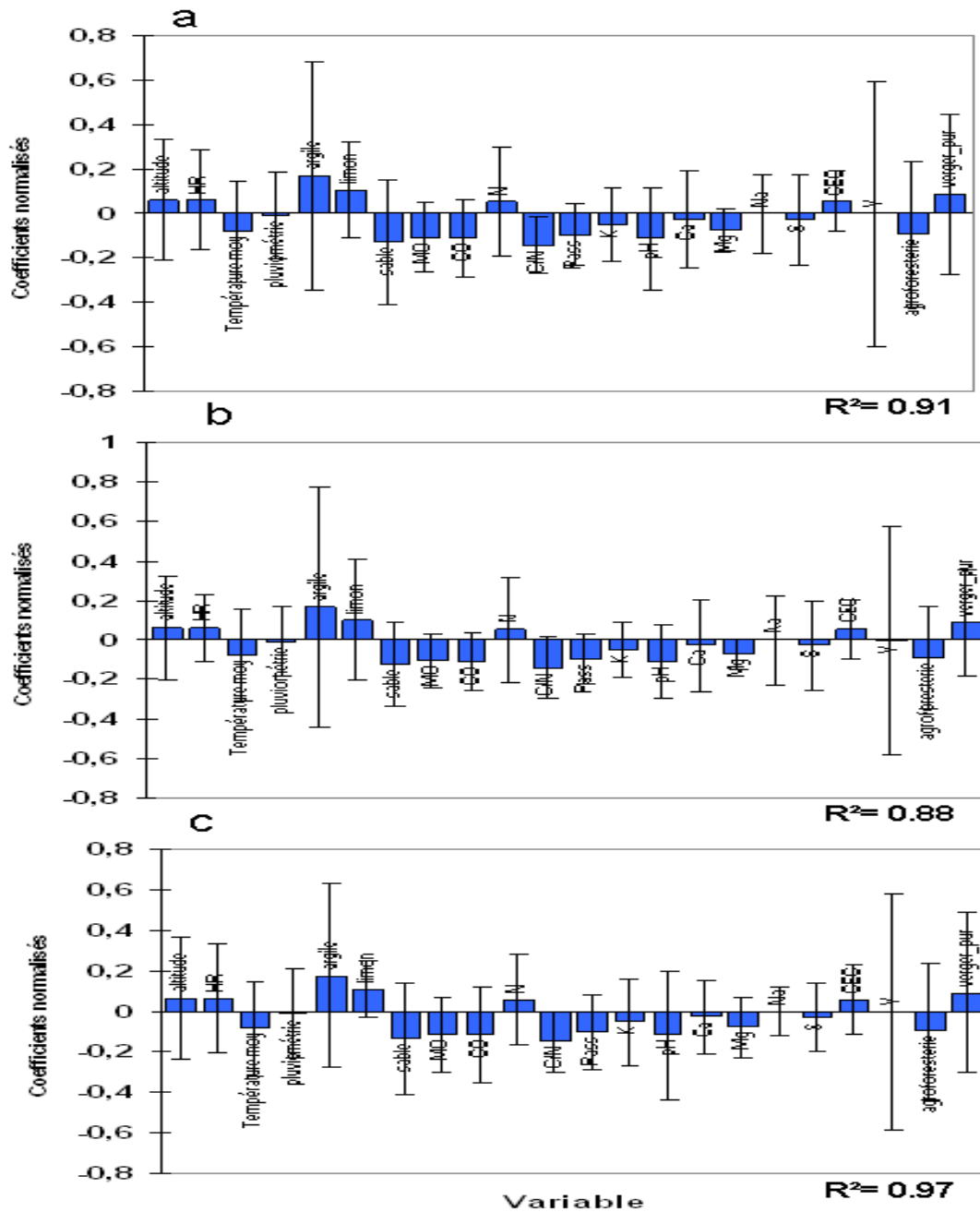
**Figure 6.5.** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur orangers (intervalle de confiance 95%).

### ○ Paramètres du modèle de régression

Sur pomélos, pour chacune des variables de la maladie, les constantes et les coefficients de régression en données centrées-réduites sont représentées dans le tableau 6.6. On constate que les constantes sont moins élevées que sur orangers. Les coefficients de régressions sont de même signes que sur orangers. Les variables Na et N, qui ne figurent pas parmi les VIP, ont des coefficients de régression centrés-réduits les plus élevés. Sur les données normalisées, les VIP ont les plus forts coefficients de régression (Figure 6.6). Les coefficients de régression normalisés sont faibles ( $<0.2$ ). Ils varient de 0.001 pour le taux de sodium (Na) à 0.16 pour le taux d'argile. Les tendances sont les mêmes pour les trois variables de la maladie. Les coefficients de régression des variables argile, sable, pH, carbone organique (CO), matière organique (MO), pH, et limon sont les plus élevés. Ces variables sont également les premières plus importantes dans le modèle. Le taux de saturation (V) figure parmi les VIP mais a un coefficient de régression très bas (0.002-0.003).

**Tableau 6.6.** Coefficients de régression des variables environnementales pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur pomélos.

Variable	Coefficients de régression*		
	Nles	Nlesm	Pom
Constante	5,596	7,954	60,246
altitude	0,000	0,001	0,003
HR	0,040	0,056	0,383
Température moy	-0,097	-0,135	-0,934
pluviométrie	0,000	0,000	-0,001
argile	0,049	0,069	0,473
limon	0,054	0,075	0,516
sable	-0,043	-0,059	-0,409
MO	-0,109	-0,151	-1,043
CO	-0,492	-0,686	-4,730
N	0,642	0,895	6,170
C/N	-0,004	-0,006	-0,040
Pass	-0,006	-0,008	-0,055
K	-0,173	-0,241	-1,664
pH	-0,433	-0,604	-4,160
Ca	-0,009	-0,012	-0,086
Mg	-0,566	-0,789	-5,440
Na	-0,811	-1,130	-7,789
S	-0,009	-0,012	-0,085
CEC	0,020	0,027	0,189
V	0,000	0,000	-0,001
agroforesterie	-0,226	-0,314	-2,166
verger_pur	0,130	0,181	1,250



**Figure 6.6.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur pomélos (intervalle de confiance à 95%).

En ne prenant en considération que les VIP, l'équation de l'incidence de la maladie (Pom), a été obtenue avec les variables centrées réduites. Sur pomélos, on a :

**Pom = 60,246 - 0,934 température moyenne + 0,085 taux d'argile - 0,409 taux de sable + 0,516 taux de limon - 1,043 taux de matière organique - 4,730 taux de carbone organique - 0,040 C/N - 0,055 phosphore assimilable - 4,160 pH - 0,001 taux de saturation du sol - 2,166 pourcentage d'arbres situés en systèmes agroforestier + 1,250 pourcentage d'arbres situés en verger pur**



### 6.3.3 Effet des facteurs environnementaux sur le comportement des satsumas

#### ○ *Choix du nombre de composantes $t_h$ et leur degré d'explication des variables*

Les résultats de la validation croisée permettent de retenir les composantes 1, 2 et 3 pour expliquer les variables Nles, Nlesm et Pom. En effet,  $Q^2_3$  et  $Q^2_4$  sont  $\geq 0.0975$  (Tableau 6.7). Toutes les variables de la maladie peuvent être expliquées par le modèle, car au niveau de la composante 3,  $Q^2_{Nles} = 0.229$  et  $Q^2_{pom} = 0.294$ ; à la composante 2  $Q^2_{Nlesm} = 0.218$ . La première composante ( $t_1$ ) explique 53% des x et 9% des y, tandis que la 2<sup>ème</sup> composante explique 16% des x et 75% des y. La 3<sup>ème</sup> composante explique 22% des x et 4% des y (Tableau 6.8).

**Tableau 6.7.** Indice de qualité du modèle par composante et par variable expliquée sur mandariniers Satsuma.

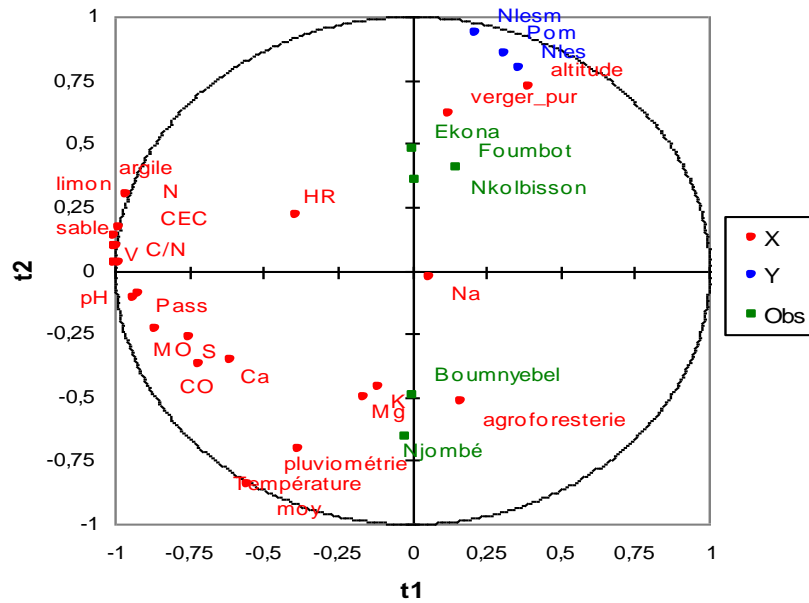
Composante	Q <sup>2</sup>			Total
	Nles	Nlesm	Pom	
1	-18,297	-27,825	-21,750	<b>-22,624</b>
2	0,011	0,218	0,046	<b>0,094</b>
3	0,229	-0,189	0,294	<b>0,183</b>
4	0,519	-0,548	0,552	<b>0,248</b>

Pour les corrélations, nous n'observerons que les composantes  $t_1$  et  $t_2$  qui expliquent environ 80% des variables x et y. Le taux de sodium (Na) est placé au centre du cercle de corrélation (Figure 6.7). Cette variable est très faiblement corrélée avec  $t_1$  et  $t_2$ . Son  $R^2$  est très faible sur  $t_1$  et  $t_2$ , mais très élevé sur  $t_3$  (Tableau 6.8). Le rapport C/N est la variable la mieux expliquée sur la composante  $t_1$  et cette corrélation est négative. L'altitude et les variables de la maladie ont de fortes corrélations positives avec la composante  $t_2$ .

La projection des sites d'observation sur le plan formé par les deux composantes permet de noter que les sites de Foubot, Nkolbisson et Ekona sont plus proches des variables de la maladie. Ce sont les sites qui présentent les attaques les plus sévères (voir résultats Chapitre 4). Par contre, les sites de Boumnyebel et Njombé sont les plus éloignés des variables de la maladie. Les sites de Kumba et Jakiri sont placés en dehors du plan.

**Tableau 6.8.** Pouvoir explicatif des composantes th du modèle de régression PLS sur satsumas.

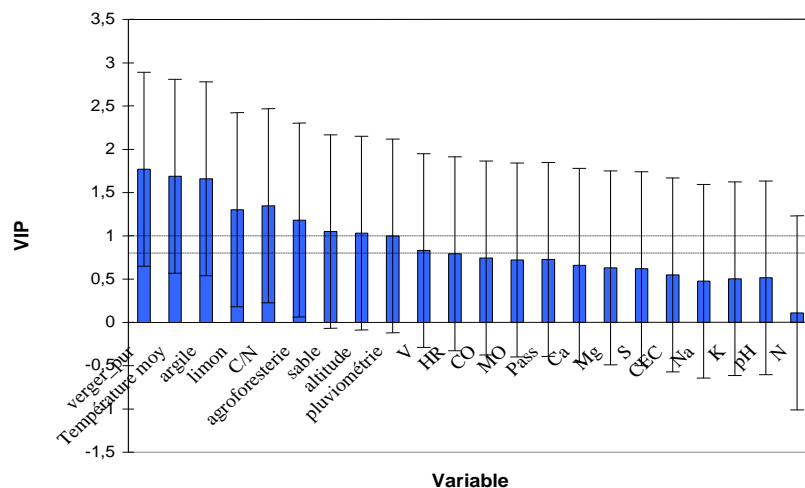
Variable	R <sup>2</sup>		
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
altitude	0,159	0,518	0,400
HR	0,148	0,046	0,005
Température	0,301	0,718	0,025
pluviométrie	0,145	0,502	0,272
argile	0,998	0,017	0,001
limon	0,968	0,028	0,017
sable	0,964	0,001	0,044
MO	0,748	0,054	0,117
CO	0,509	0,139	0,242
N	0,925	0,087	0,017
C/N	1,000	0,009	0,002
Pass	0,875	0,013	0,045
K	0,012	0,214	0,651
pH	0,847	0,009	0,073
Ca	0,366	0,128	0,320
Mg	0,027	0,254	0,570
Na	0,004	0,001	0,985
S	0,561	0,072	0,224
CEC	0,980	0,009	0,011
V	0,992	0,001	0,000
agroforesterie	0,029	0,268	0,242
verger_pur	0,017	0,384	0,481
<b>R<sup>2</sup>x</b>	<b>0,526</b>	<b>0,158</b>	<b>0,216</b>
Variable	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
Nles	0,131	0,639	0,075
Nlesm	0,045	0,881	0,000
Pom	0,096	0,733	0,053
<b>R<sup>2</sup>y</b>	<b>0,091</b>	<b>0,751</b>	<b>0,043</b>



**Figure 6.7.** Position des sites dans le cercle de corrélation des variables du climat, du sol et de la maladie avec les composantes t1 et t2 sur satsumas.

#### ○ Importance des variables dans le modèle

Le nombre de variables les plus importantes qui entrent dans la construction du modèle ( $VIP > 0.8$ ) est 11 (Figure 6.8). Sur le graphe, elles vont par ordre d'importance du système de verger pur à l'humidité relative (HR). On note que la texture du sol, le système de culture, le climat et l'altitude sont importants.



**Figure 6.8** Représentation des facteurs les plus importants ( $VIP > 0.8$ ) qui construisent le modèle de l'influence des facteurs environnementaux sur le développement de la Phaeoramulariose sur mandariniers Satsuma (intervalle de confiance 95%).

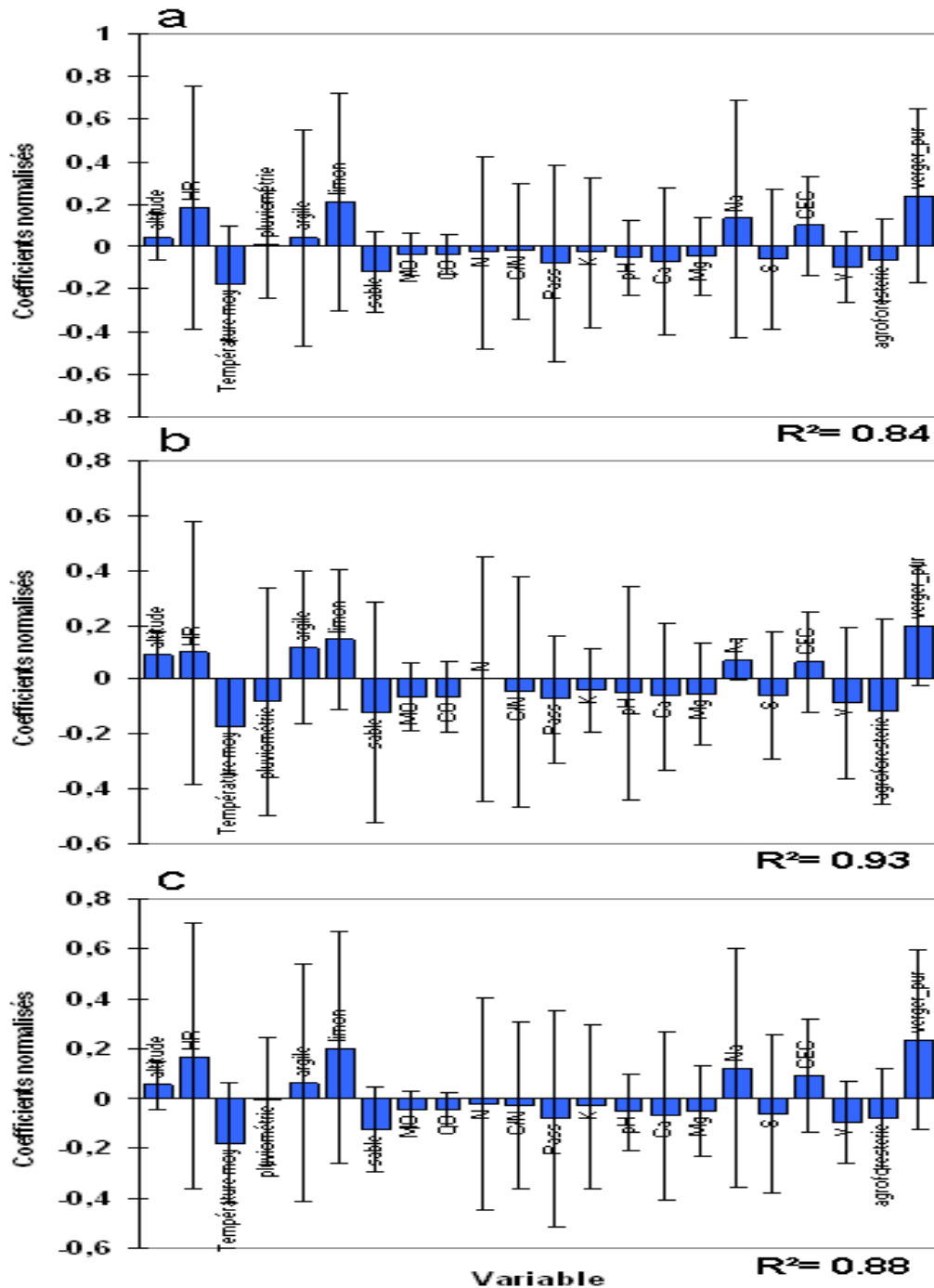
○ *Paramètres du modèle de régression*

Sur Satsumas, pour chacune des variables de la maladie, les constantes et les coefficients de régression en données centrées-réduites sont représentées dans le tableau 6.9. On constate que les constantes sont moins élevées que sur orangers et pomélos. Les coefficients de régressions sont de même signes que pour les 2 précédentes variétés. La variable Na qui ne figure pas parmi les VIP a les coefficients de régression centrés-réduits les plus élevés. Sur les données normalisées, les VIP ont les plus forts coefficients de régression (Figure 6.9). En général, les coefficients de régression normalisés sont faibles ( $<0.2$ ). Toutefois, certaines variables comme le taux de limon et le système verger pur se distinguent des autres avec des coefficients de régression  $\geq 0.2$ . Les coefficients varient de 0.004 pour le taux d'azote (N) à 0.24 pour le système verger pur. Les tendances sont les mêmes pour les trois variables de la maladie. Les VIP (humidité relative, température moyenne, système verger pur) ont les coefficients de régression les plus élevés.

**Tableau 6.9.** Coefficients de régression des variables environnementales centrées-réduites pour chaque paramètre de la phaeoramulariose sur satsumas.

Variable	Coefficients de régression*		
	Nles	Nlesm	Pom
Constante	-0,392	2,263	-2,870
altitude	0,000	0,000	0,002
HR	0,020	0,026	0,520
Température	-0,046	-0,109	-1,290
pluviométrie	0,000	0,000	0,000
argile	0,002	0,014	0,085
limon	0,016	0,028	0,436
sable	-0,007	-0,016	-0,187
MO	-0,021	-0,083	-0,671
CO	-0,038	-0,146	-1,209
N	-0,091	0,031	-1,915
C/N	0,000	-0,001	-0,005
Pass	-0,001	-0,001	-0,019
K	-0,014	-0,049	-0,423
pH	-0,038	-0,081	-1,046
Ca	-0,006	-0,014	-0,174
Mg	-0,052	-0,145	-1,514
Na	11,736	14,939	299,378
S	-0,004	-0,010	-0,122
CEC	0,006	0,009	0,146
V	-0,002	-0,005	-0,061
agroforesterie	-0,054	-0,228	-1,794
verger_pur	0,074	0,148	2,026

\*coefficients de régression en données centrées-réduites



**Figure 6.9.** Coefficients de régression normalisés des variables explicatives (altitude, climat, sol) pour la variable Nles (a), Nlesm (b) et Pom (c) de la phaeoramulariose sur satsumas (intervalle de confiance à 95%).

En ne prenant en considération que les VIP, l'équation de l'incidence de la maladie (Pom), a été obtenue avec les variables centrées réduites. Sur satsumas, on a :

$$\text{Pom} = -2,870 + 0,002 \text{ altitude} - 1,290 \text{ température moyenne} - 0,0003 \text{ pluviométrie} + 0,520 \text{ Humidité Relative} + 0,473 \text{ taux d'argile} - 0,187 \text{ taux de sable} + 0,436 \text{ taux de limon} - 0,005 \text{ C/N} - 0,061 \text{ taux de saturation du sol} - 1,794 \text{ pourcentage d'arbres situés en systèmes agroforestier} + 2,026 \text{ pourcentage d'arbres situés en verger pur}$$

## 6.4 Discussions

### 6.4.1 Facteurs du sol

Les variables liés à la texture du sol (le taux d'argile, taux de sable et taux de limon) sont très importantes dans le développement de la maladie sur orangers, pomélos et satsumas. Les taux d'argile et de limon sont corrélés positivement aux variables de la maladie, tandis que le taux de sable est corrélé négativement. Plus le taux d'argile et/ou de limon est important plus l'incidence de la maladie augmente. Par contre, plus le taux de sable est important, moins les arbres sont attaqués. Les coefficients de régression du taux de limon sont plus importants que ceux du taux de sable et du taux d'argile en ce qui concerne le modèle sur satsumas. Par contre, ceux de l'argile et du sable sont plus importants sur pomélos. Sur orangers, le taux de limon n'est pas une variable importante dans l'équation de la maladie. Ces résultats semblent être en contradiction avec les résultats de l'enquête qui montrent que les arbres situés en sol sableux sont plus attaqués par la maladie (Ndo *et al*, 2010). Il faut cependant rappeler qu'au cours de cette enquête les caractéristiques du sol étaient décrites uniquement après observation. Lors des expérimentations par contre, les analyses du sol ont été effectuées en laboratoire, ce qui permet de penser que ces résultats sont plus fiables.

Les matières organiques du sol jouent également un rôle très important sur le niveau de la maladie. Sur orangers, la matière organique, le carbone organique et le rapport C/N sont classés parmi les facteurs les plus importants du modèle, sur pomélos il s'agit seulement du carbone organique. Sur satsumas, le carbone organique et le rapport C/N sont importants. Ces 3 variables ont des coefficients de régressions négatifs, ils sont corrélés négativement à la maladie. Les arbres situés sur des sols riches en matière organique et carbone organique sont moins attaqués par la phaeoramulariose.

Le pH du sol est important dans l'équation de régression de la maladie. Son coefficient de régression est négatif et il est corrélé négativement aux variables de la maladie. Les sols plus acides favorisent le développement de la maladie sur oranger et sur pomélos. Sur Satsuma, cette variable n'est pas importante. Des études ont montré l'importance du rôle joué par le pH du sol sur le développement d'autres maladies de plantes. Sur caféier Arabica, l'incidence de la rouille orangée, qui s'attaque aux feuilles, augmente également avec une diminution du pH (Lamouroux *et al*, 1995; Avelino, 1999).

D'autres variables du sol comme le taux de magnésium sur orangers, le phosphore assimilable sur orangers et pomélos et le taux de saturation pour toutes les variétés sont des variables importantes. Toutes ces variables sont corrélées négativement à la maladie avec des coefficients de régressions négatifs. Plus un sol est riche en phosphore et bases échangeables moins les arbres qui y sont situés sont malades.

Ces conditions qui favorisent une diminution de l'intensité de la maladie sont semblables aux conditions optimales nécessaires pour la croissance des agrumes. En effet, les agrumes se développent mieux sur des sols biens drainés (plus sableux et moins argileux). Un pH variant entre 5.5 et 7 (optimum 6-7) est nécessaire pour le bon développement des agrumes (Walali Loudyi *et al*, 2003). Ils ont besoin d'apports en azote, phosphore, potassium et aussi de micro nutriments comme le magnésium, le cuivre, le zinc. L'hypothèse est que les conditions de sol optimales au développement des arbres pourraient les rendre moins sensibles ou moins vulnérables à la phaeoramulariose. Cette hypothèse est contraire à celle émise dans le cadre

du pathosystème *Hemileia vastatrix* - *Coffea arabica* où les milieux qui favorisent le développement du caféier sont favorables au développement de la rouille orangée (Lamouroux *et al*, 1995 ; Avelino, 1999 ; Avelino *et al*, 2004).

Dans toutes les équations de régression, le taux d'azote et le taux de potassium ne sont pas apparus comme des variables importantes. Ces éléments sont pourtant avec le phosphore les plus importants pour le développement des plantes et représentent souvent les apports de base dans toute fertilisation de sol. Les coefficients de régression et de corrélation sont en général négatifs pour le potassium et positifs pour l'azote. Ainsi, bien que n'étant pas très important sur le développement de la maladie, on peut tout de même dire que plus le taux d'azote d'un sol est élevé, plus l'intensité de la maladie est forte. En ce qui concerne le potassium, c'est le contraire. On note que de tous les éléments du sol, seul le taux d'azote présente une corrélation positive avec les variables de la maladie.

#### 6.4.2 Facteurs climatiques et altitude

L'importance de la température moyenne est soulignée dans toutes les équations de régression sur toutes les variétés. Cette variable fait toujours partie des premières VIP dans les différents modèles et c'est la variable climatique la plus importante. Elle a un coefficient de régression élevé et négatif. La corrélation est négative avec toutes les variables de la maladie. Plus la température baisse, plus les arbres sont attaqués. Cette variable est plus importante sur oranger et satsumas que sur pomélos. Sur pomélos, c'est la seule variable climatique importante.

La pluviométrie fait partie des variables importantes dans le développement de la maladie sur orangers et satsumas, mais pas sur pomélos. Le coefficient de régression de cette variable est négatif. Le coefficient de régression de l'humidité est positif. L'humidité relative fait partie des variables les plus importantes uniquement sur satsumas.

L'altitude est classée parmi les VIP sur oranger et sur satsumas. Son coefficient de régression est positif. Il en est de même de son coefficient de corrélation avec les variables de la maladie. Plus l'altitude est élevée, plus l'incidence de la maladie sur les arbres est élevée. On note sur les différents modèles de régression une plus grande importance de la température par rapport à l'altitude et aux autres variables du climat.

Dans la plupart des études antérieures sur phaeoramulariose ou cercosporiose des agrumes, l'altitude apparaît comme l'un des principaux facteurs qui influencent le développement de la maladie (Seif & Hillocks, 1993 ; Diallo, 2001 ; Kuate 2002 ; Ndo *et al*, 2010). La température est souvent mentionnée comme un facteur moins important ou corrélé à l'altitude. La régression PLS a permis une meilleure estimation de la température dans l'équation de la maladie. En effet, une simple élévation en altitude ne peut avoir aucune influence sur la maladie si elle n'est pas accompagnée d'une baisse de température. Par contre, une baisse de température même sans élévation en altitude peut favoriser une augmentation de l'incidence de la maladie. Le site d'Ekona vérifie cette hypothèse. En effet, l'altitude moyenne d'Ekona est de 442.1 m, la température moyenne est de 23.7°C. L'incidence de la maladie sur orangers, pomélos et satsumas n'est pas significativement différente de celle de Foubot (température moyenne 23°C, altitude 1010.5 m). La différence entre la température moyenne de Foubot et celle d'Ekona n'est pas très grande, mais l'écart entre les altitudes est considérable.

Le nombre élevé des sites d'étude lors de l'enquête (39), avec plusieurs sites d'altitudes différentes mais ayant les mêmes variables climatiques a favorisé la mise en exergue de l'altitude comme facteur principal (Ndo *et al*, 2010). Dans le cadre de la présente étude, le nombre de site est réduit et chaque site a une altitude et des variables climatiques uniques.

L'importance de la pluviométrie sur le développement de la maladie ressort dans un certain nombre d'études menées sur cette maladie. Il est démontré qu'une augmentation de la pluviométrie entraîne une augmentation de l'incidence de la maladie (Kuate, 1998 ; Seif, 2001 ; Diallo, 2003). Des floraisons décalées par des arrosages en saison sèche ont d'ailleurs permis de réduire significativement les attaques des maladies (Kuate & Fourré, 1988). L'importance de cette variable sur pomélos n'a pas été décelée. Par contre, sur orangers et satsumas, elle est très importante dans le modèle. Cependant, les équations de régression montrent que l'incidence de la maladie baisse avec une augmentation de la pluviométrie. Ce résultat semble être contraire à ceux obtenus dans les précédentes études. Il révèle cependant le rôle double que peut jouer la pluviométrie. En effet, des études ont montré que pour des spores qui sont disséminées à courte distance, la pluie, en même temps qu'elle favorise la libération des spores et leur dépôt sur des plantes sensibles, peut également lorsqu'elle est violente ou prolongée entraîner le lessivage des spores déjà déposées et donc être défavorable à la progression de la maladie (Sache, 2000 ; Tucker *et al*, 2001). Dans le cas de la phaeoramulariose, cet aspect devrait être mieux étudié en laboratoire et par des expérimentations en champ.

### **6.4.3 Système de production**

Les deux systèmes de production (agroforesterie et verger pur) étaient classés parmi les variables importantes sur les différents modèles. Sur oranger, seul le système agroforestier est retenu comme VIP. Sur pomélos et satsumas, les deux variables sont importantes. Les coefficients de corrélation sont négatifs pour le système agroforestier et positifs pour le verger pur. Ce résultat confirme l'analyse de variance effectuée entre les différents sites (Chapitre 4). Ceci suggère toutes conditions étant égales par ailleurs que l'intensité de la maladie est plus faible sur les arbres situés en systèmes agroforestiers que sur les arbres en vergers pur. L'hypothèse ici étant que les arbres et autres cultures associées peuvent jouer le rôle de brise vent. L'inoculum étant dispersé beaucoup plus par le vent (Seif, 1996 ; Seif & Hillocks, 1998 ; Kuate, 1998), son évolution devient plus difficile dans un tel système que dans un système où toutes les espèces sont hôtes du même agent pathogène. L'illustration de la composition et l'analyse de sa structure spatiale de ces deux types de parcelles (Chapitre 2) permettent de mieux expliquer ce résultat.

Le système agroforestier semble donc être moins favorable au développement de la maladie. Dans ce système les agrumes sont en association avec d'autres plantes. Ces plantes forment avec d'autres bioagresseurs des pathosystèmes qui nécessitent d'être pris en considération pour optimiser la production du système. Dans cette optique, il est nécessaire de mettre en évidence la gamme d'hôtes des agents pathogènes qui s'attaquent à ces plantes. Dans le cas de la phaeoramulariose, on ne connaît pas d'autres hôtes en dehors des agrumes. Lors de la mise en place de ces systèmes, la disposition spatiale des agrumes devrait viser l'isolement des variétés sensibles. En revanche, on connaît dans ce type de système l'existence de bioagresseurs ayant une large gamme d'hôtes. Les mirides par exemple s'attaquent aux



cacaoyers et aux kolatiers (Babin, 2009). Les mouches de fruits s'attaquent aux agrumes et aux autres arbres fruitiers (manguiers, goyaviers...) (Ndzana *et al*, 2008).

Il apparaît donc important de développer un système agroforestier raisonné qui peut permettre une optimisation des productions et une gestion intégrée des bioagresseurs présents.



## ***Chapitre 7 :***

### ***Synthèse, Conclusion et Perspectives***



## Chapitre 7 : Synthèse, Conclusion et Perspectives

### 7.1 Introduction

La phaeoramulariose causée par *Pseudocercospora angolensis* est une des maladies les plus destructrices sur agrumes en Afrique tropicale. Depuis sa découverte en Angola en 1952, sa propagation progresse et elle se retrouve de nos jours dans 22 pays dont 21 d'Afrique tropicale et 1 d'Asie (le Yémen). Cette maladie représente un véritable fléau : non seulement elle cause des pertes pouvant aller à 100% des récoltes de fruits, mais aussi les productions de fruits frais ou de matériel végétal sont mises en quarantaine. Cette situation porte préjudice aux économies déjà fragiles des petits producteurs qui fournissent l'essentiel des productions sur les marchés. Cette maladie représente également une grande menace pour les grands pays producteurs d'agrumes tels que le Brésil, la Chine, les Etats-Unis d'Amérique, l'Afrique du Sud,... qui offrent des conditions climatiques similaires à celles des pays attaqués.

Les premiers travaux de recherche effectués dans les pays touchés par cette maladie se sont orientés vers l'identification de l'agent pathogène et la description des symptômes de la maladie. Par la suite, les études épidémiologiques préliminaires effectuées ont permis d'obtenir une carte de répartition de la maladie. Il a également été démontré que l'incidence de la maladie augmente avec une élévation en altitude. Des conditions de température fraîche ( $<20^{\circ}\text{C}$ ) et de forte humidité relative ( $>60\%$ ) se sont également avérées très favorables au développement de la maladie. Des études de sensibilité variétale faites jusqu'ici n'ont permis de trouver aucune variété résistante à la phaeoramulariose. Toutefois des niveaux de sensibilité différents ont été observés. Ceci a permis de classer les géotypes d'agrumes selon trois groupes de sensibilité. Les agrumes très sensibles sont les pomélos et plusieurs mandariniers. Les orangers et autres mandariniers sont moyennement sensibles, tandis que les citronniers, limes, satumas et pamplemoussiers sont peu sensibles.

Le seul moyen de lutte efficace contre cette maladie est l'utilisation des fongicides. Plusieurs travaux sur l'efficacité de nombreux fongicides ont été réalisés. Néanmoins, les fréquences d'application et leur coût constituent un frein à leur utilisation par les petits producteurs. Par ailleurs, ce mode de lutte ne permet pas de respecter les normes des produits écologiquement propres. Il apparaît donc nécessaire de développer une méthode de lutte intégrée et optimisée. Ceci passe par une meilleure connaissance de la maladie et des facteurs qui la favorisent.

Les facteurs climatiques et la sensibilité des géotypes ont été identifiés comme influents sur le développement de la maladie ; mais des cas observés dans plusieurs sites montrent que leurs effets et leurs interactions sont toujours difficiles à cerner. Sachant que l'environnement joue un rôle primordial dans le développement de la maladie, nous avons été amenés à nous poser les questions suivantes :

- Quels sont les facteurs environnementaux qui déterminent le développement de la phaeoramulariose dans les zones humides du Cameroun ?
- Quelle est l'influence de chacun de ces facteurs sur l'interaction hôte-parasite ?
- Quelle est l'importance ou le poids de chaque facteur dans l'épidémiologie ?

A partir de ces questions, nous nous sommes fixés 3 objectifs spécifiques :

- Identifier les facteurs biotiques et abiotiques qui déterminent le niveau épidémiologique ;
- Evaluer l'impact des principaux facteurs sur la sévérité de la maladie (climat, altitude, matériel végétal, paramètres du sol, ombrage, répartition spatiale des arbres) ;
- Elaborer un modèle de prédiction du risque de la phaeoramulariose.

Ce chapitre sera donc consacré au rappel des principaux résultats obtenus, à l'analyse de leur importance dans la recherche d'une stratégie de lutte intégrée contre la phaeoramulariose des agrumes et aux perspectives de ce travail.

## **7.2 Principaux résultats**

### **7.2.1 Illustration de la composition et de la structure des peuplements à base d'agrumes**

Dans le cadre de cette thèse, nous avons travaillé dans deux types de systèmes de productions, la production en vergers purs d'agrumes et la production en systèmes agroforestiers. L'objectif de ce chapitre était de comparer la composition et la structure spatiale de deux parcelles appartenant à ces deux systèmes de production différents. La connaissance de la structure spatiale des deux types de parcelles pouvait nous conduire à émettre des hypothèses sur la répartition de la phaeoramulariose des agrumes dans ces différents systèmes.

L'illustration de la composition des deux parcelles a mis en exergue la diversité de plantes mises en association dans la parcelle agroforestière, à l'inverse du verger qui était composé uniquement d'agrumes. La cartographie de ce verger a également révélé l'homogénéité de la structure spatiale de la parcelle.

L'analyse de la structure de la parcelle agroforestière a permis de mettre en évidence une structure agrégée des différentes sous-populations qui composent la parcelle. Les tailles des agrégats étaient variables et certains étaient répartis de façon hétérogène dans la parcelle. Il a été mis en évidence que les agrégats d'agrumes étaient plantés séparés les uns des autres par des agrégats d'autres groupes de plantes (forestiers, cacaoyers, palmiers...). Cette structure est moins favorable à la dispersion de la maladie que les vergers purs d'agrumes.

### **7.2.2 Identification des facteurs associés au développement de la phaeoramulariose dans les zones humides du Cameroun**

Dans cette partie, nous avons conduit une enquête dans 39 sites appartenant à 13 bassins de production des agrumes des zones humides du Cameroun. Cette enquête avait pour but l'analyse de l'ensemble des facteurs physiques, phytotechniques et biologiques afin de mettre en évidence leur relation avec le niveau de la maladie. L'évaluation de la maladie dans les 39 sites a montré que la phaeoramulariose se retrouvait dans tous les sites, des plus basses altitudes (10 m) aux plus élevées (1684 m). Ceci est une preuve que l'inoculum se retrouve désormais dans tous les bassins de production de la zone humide du Cameroun.

Dans chaque bassin de production, on a constaté une variabilité du niveau de la maladie. Des différences significatives ont en effet été notées entre les 3 sites de chaque bassin de production. Seuls les bassins de Boumnyebel et Mbangassina ont présenté des niveaux de sévérité identiques entre les sites. Une diversité a également été constatée entre les différents bassins de productions par rapport aux facteurs biotiques et abiotiques (espèces d'agrumes, altitude, climat, types de sol, pratiques culturales).

L'analyse de régression logistique a permis de retenir l'altitude, l'espèce d'agrumes, le type de sol et le type de végétation comme les facteurs les plus importants associés à la maladie. L'analyse de segmentation CART a confirmé l'importance des deux premiers facteurs (altitude, espèce d'agrumes). Elle a également révélé des interactions entre ces principaux facteurs et la température moyenne, la pluviométrie, le type d'entretien des arbres. Ces interactions ont surtout été mises en évidence dans les sites situés en altitude moyenne. En haute altitude (>1000m) ou en très basse altitude (<200m), c'est l'influence de l'altitude qui est mise en exergue. La sévérité de la maladie était élevée en haute altitude et faible en basse altitude. En altitude moyenne (350-600 m) la sévérité de la maladie était très variable. Elle était faible dans certains sites et élevée dans d'autres. La classification ascendante hiérarchique des bassins de production a permis de former 5 groupes de bassins en fonction de la sévérité de la maladie. Nous avons un groupe formé par les bassins de basse altitude, un groupe formé par le bassin de haute altitude et 3 groupes formés par les bassins de moyenne altitude.

Ces résultats nous ont orientés dans la suite du travail. Les principaux facteurs retenus étant l'altitude, l'espèce d'agrumes et le type de sols, des expérimentations mettant en exergue ces 3 facteurs devaient être menées pour confirmer leur importance. Le choix des différents sites a également été guidé par ces résultats. Etant donné que nous avions plus de groupes formés par les bassins de moyenne altitude, cela supposait une plus grande variabilité dans ces bassins. Cinq sites de moyenne altitude (Nkolbisson, Ekona, Kumba, Bokito et Boumnyebel) ont donc été choisis. En basse altitude, le site de Njombé a été retenu. En haute altitude le choix a porté sur deux sites Foubot et Jakiri.

Lors du choix des sites, la présence des agrumes dans deux principaux systèmes de production a été prise en considération. Dans certains sites, les parcelles correspondaient à des vergers purs d'agrumes. Dans d'autres, il s'agissait des parcelles agroforestières.

### **7.2.3 Evaluation de l'interaction facteurs abiotiques-variétés sur l'incidence de la maladie**

Il s'agissait dans cette partie de caractériser les différents sites (en termes de climat, sol et système de production) et d'expliquer le degré de sévérité de la maladie sur chacune des variétés d'agrumes en fonction des facteurs climatiques, édaphiques et du système de production du site dans lequel elle se trouve. Les parcelles de 8 sites ont été utilisées.

Les principaux résultats ont confirmé la très grande variabilité déjà observée au niveau de l'enquête. Tous les sites étaient significativement différents par le climat et le type de sol. Les analyses de sols ont particulièrement montré une très grande diversité entre les sites. Ces analyses ont également révélé les faibles teneurs en nutriment de la plupart des sols. Les analyses de variances nous ont permis d'observer que, d'une année à l'autre, le niveau de maladie ne varie pas à la même date d'observation.

Concernant la comparaison des différentes variétés, les sévérités sur orangers et sur pomélos étaient en général les plus élevées, mais il était parfois difficile de déterminer entre les 2 espèces laquelle était la plus attaquée. Tout comme était difficile la différenciation entre les différents mandariniers et la lime Tahiti. Ces variétés présentaient les sévérités les plus faibles.

Des études répartissent les espèces d'agrumes dans 3 grands groupes en fonction des similarités génétiques. Il s'agit du groupe des orangers et mandariniers, du groupe des pomélos et pamplemoussiers et du groupe des limes et citronniers (Luro *et al*, 2001). On constate que ce regroupement génétique n'est pas similaire aux regroupements effectués dans de nombreuses études par rapport à la sensibilité à *P. angolensis*.

L'évaluation de l'interaction site-variété sur l'incidence de la maladie a été effectuée dans 2 types de parcelles :

- Dans les vergers expérimentaux, la sévérité de la maladie sur orangers, pomélos et satsumas était plus élevée à Nkolbisson, Ekona (moyenne altitude ; une température  $>25^{\circ}\text{C}$ ) et Foumbot (haute altitude ; une température  $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ). Sur lime Tahiti et mandarinier beauty, les taux de sévérité les plus élevés étaient observés en haute altitude. Mais les différences de sévérité observées sur ces variétés entre la haute et la moyenne altitude n'étaient pas toujours significatives. La sévérité de la maladie était plus faible à Njombé (basse altitude ; température  $>25^{\circ}\text{C}$ ) sur toutes les variétés.
- Dans les parcelles paysannes, la sévérité de la maladie sur orangers et pomélos était plus élevée dans la parcelle de Kumba (verger pur situé en moyenne altitude). Elle était moins élevée dans les parcelles de Jakiri (parcelle agroforestière située en haute altitude) et dans celles de Bokito et Boumnyebel (parcelles agroforestières situées en moyenne altitude). Pour les mandariniers Satsuma et Madagascar, les différences de sévérités n'étaient pas significatives entre les sites.

Pour les orangers, pomélos et satsumas, dans les vergers ayant des plans identiques et les mêmes traitements, on a observé un même niveau de maladie en haute altitude et en moyenne altitude. L'altitude, par le biais de la température, n'était donc pas le principal facteur déterminant le niveau de la maladie. Le sol (texture et la composition) devrait certainement jouer un rôle déterminant. Au niveau des parcelles paysannes, sur orangers et pomélos, le taux de maladie était plus élevé en verger pur qu'en système agroforestier. Le type de système ou le sol pourraient avoir une influence sur le développement de la maladie. S'agissant de la lime Tahiti ou du mandarinier Beauty qui sont deux variétés peu sensibles, la sévérité de la maladie augmentait avec une élévation en altitude.

#### **7.2.4 Evaluation de la nutrition azotée sur l'incidence de la maladie**

Les précédents résultats ont mis en évidence l'influence du type de sol sur le niveau de la maladie. Cette influence peut être liée à la texture du sol ou à sa fertilité. En ce qui concerne la fertilité du sol, l'azote est l'un des nutriments primaires dont la teneur a un effet direct sur la croissance et la résistance des plantes face au stress. Nous avons supposé que la teneur en azote pouvait avoir une influence sur le développement de la phaeoramulariose. L'azote a été apporté aux plantes sous deux formes. Le premier traitement consistait en une dose de 750 g



par arbre et par an appliquée en une fois. Le deuxième traitement était constitué de la même dose appliquée en 3 fois. Ce traitement est comparable aux apports de déchets organiques dont bénéficient beaucoup d'agrumes dans ces zones. Le troisième traitement était un témoin sans apport d'engrais.

L'analyse de variance n'a permis de mettre en évidence aucun effet de la fertilisation azotée sur la maladie. Les trois traitements n'ont présenté aucune différence significative par rapport à la sévérité de la maladie quel que soit le site (Cf Annexe).

### **7.2.5 Evaluation de l'ombrage et répartition spatiale de la maladie**

L'effet de l'ombrage a été évalué dans deux parcelles. La première située à Bokito est une parcelle agroforestière à base de cacao. Les mandariniers évalués étaient âgés d'une quinzaine d'année et placés à l'ombre de grands arbres forestiers et d'autres arbres fruitiers. Ils étaient comparés aux mandariniers placés en plein soleil. La deuxième parcelle située à Foubot est composée de jeunes pomélos (1an) placés sous ombrage de manguiers (indice d'ombrage plus élevé) d'une part, et d'avocatiers (indice d'ombrage moins élevé) d'autre part. Les plants sous ombrage étaient comparés à ceux situés en plein soleil.

L'effet de l'ombrage a été mis en évidence au moyen de l'analyse de variance. Il a été démontré que les arbres situés sous ombrage étaient moins attaqués que ceux situés en plein soleil quel que soit le site. Néanmoins, dans la parcelle de Bokito, la sévérité de la maladie n'était pas toujours significativement différente entre les arbres placés sous ombrage et ceux placés en plein soleil. Il a également été mis en évidence que l'incidence de la maladie évolue avec le degré de l'ombrage. Plus l'indice d'ombrage était élevé, moins les arbres étaient attaqués.

Dans la parcelle de Foubot, l'effet de l'ombrage a été mis en évidence par analyse de variance. Les résidus issus de cette analyse de variance ont été analysés pour détecter d'éventuels effets spatiaux. La structure de la répartition de la maladie n'est pas uniforme, mais est constituée d'agrégats de petite taille. Au-delà de 12 m on n'observait plus de dépendance spatiale entre les plants. Ceci a été expliqué par le mode de dispersion de la maladie. En effet, l'inoculum est transporté d'un arbre à l'autre soit par le vent ou par les « splash » de pluie et ces deux éléments ne peuvent pas transporter les conidies sur de grandes distances (>12 m). Chaque plant contaminé assure donc l'approvisionnement en inoculum pour les arbres situés autour de lui. Ce scénario permet d'expliquer la structure spatiale de la maladie sous forme d'agrégats de rayons  $\leq 12$  m.

### **7.2.6 Variables de prédiction pour la gestion du risque**

Les données du climat, du sol et du système de production ont été utilisées pour élaborer un modèle de prédiction des facteurs de risque face à la phaeoramulariose. La régression PLS a été utilisée. Cette analyse a été utilisée pour 3 espèces d'agrumes, les orangers, les pomélos et les mandariniers satsumas.

### **7.2.6.1 Sol**

Les variables liées à la texture du sol (taux d'argile, taux de sable et taux de limon) se sont avérées très importantes dans le développement de la maladie sur orangers, pomélos et satsumas. Les taux d'argile et de limon étaient corrélés positivement aux variables de la maladie, tandis que le taux de sable était corrélé négativement. Ceci indique que plus le taux d'argile et/ou de limon est important plus l'incidence de la maladie augmente. Par contre, plus le taux de sable est important, moins les arbres sont attaqués. Sur orangers, le taux de limon n'était pas une variable importante dans l'équation de la maladie. Sur satsumas par contre, le taux de limon était plus important que le taux de sable et d'argile.

Les matières organiques du sol jouent également un rôle très important sur le niveau de la maladie. Sur orangers, la matière organique, le carbone organique et le rapport C/N ont été classés parmi les facteurs les plus importants du modèle. Sur pomélos, il s'agissait seulement du carbone organique. Sur satsumas, le carbone organique et le rapport C/N se sont avérés importants. Ces 3 variables avaient des coefficients de régressions négatifs, elles étaient corrélées négativement à la maladie. Les arbres situés sur des sols riches en matière organique et/ou carbone organique, sont moins attaqués par la *phaeoramulariose*.

L'importance du pH du sol a été mise en évidence dans l'équation de régression de la maladie. Le coefficient de régression du pH était négatif. Les sols plus acides favorisent le développement de la maladie sur oranger et sur pomélos. Sur Satsuma, cette variable n'est pas apparue importante.

Le taux de magnésium sur orangers, le phosphore assimilable sur orangers et pomélos et le taux de saturation pour toutes les variétés se sont également avérés importants. Toutes ces variables étaient corrélées négativement à la maladie. Plus un sol est riche en phosphore et bases échangeables moins les arbres qui y sont situés sont malades.

### **7.2.6.2 Climat et altitude**

L'importance de la température moyenne a été soulignée dans toutes les équations de régression sur toutes les variétés. Cette variable faisait toujours partie des premières variables importantes dans la projection (VIP) dans les différents modèles et c'était la variable climatique la plus importante. Elle avait un coefficient de régression élevé et négatif.

La pluviométrie faisait partie des variables importantes dans le développement de la maladie sur orangers et satsumas, mais pas sur pomélos. Le coefficient de corrélation de la pluviométrie était négatif.

L'altitude était classée parmi les VIP sur orangers et sur satsumas. Son coefficient de régression était positif. L'altitude ne faisait pas partie des VIP sur pomélos. L'humidité relative était une variable importante sur satsumas.

### 7.2.6.3 Système de production

Les deux systèmes de production (agroforesterie et verger pur) étaient classés parmi les variables importantes sur les différents modèles. Sur orangers, seul le système agroforestier était retenu comme VIP. Sur pomélos et satsumas, les deux variables étaient importantes. Les coefficients de corrélation étaient négatifs pour le système agroforestier et positif pour le verger pur. Ce résultat a confirmé l'analyse de variance effectuée entre les différents sites. Ceci a montré, toutes conditions étant égales par ailleurs, que l'intensité de la maladie était plus faible sur les arbres situés en systèmes agroforestiers que sur les arbres en vergers pur.

## 7.3 Conséquences sur la prédiction et la gestion de la maladie

Connaissant les caractéristiques d'un site, on peut essayer de prédire le niveau de maladie sur les variétés d'agrumes présentes. Les équations des modèles obtenues sont toutefois perfectibles. Toutes les variables n'ont pas pu être mesurées. A titre d'exemple, le pouvoir de l'agent pathogène et sa variabilité qui est sûrement un facteur important du tétrahédre de la maladie (Zadocks, 2001) n'a pas été pris en compte. En outre, le nombre de sites utilisés était très limité. Les résultats obtenus permettent de détecter, parmi les facteurs étudiés, quels sont ceux qui ont le plus d'influence sur le développement de la maladie.

### 7.3.1 Influence des facteurs pédoclimatiques

L'incidence de la maladie est plus importante dans les zones de hautes altitudes où les températures sont plus basses. Il s'agirait de mieux comprendre cette relation entre la température et l'incidence de la maladie, notamment pour des températures plus basses que celles existantes dans notre zone d'étude afin d'identifier les zones potentielles d'émergence. Ceci est particulièrement important pour définir des cartes de risques et retarder au maximum l'émergence de cette maladie dans les zones à risques. Les sites d'étude sur la phaeoramulariose ont en général des températures  $\geq 20^{\circ}\text{C}$ . Cependant, des études en laboratoire pourraient utiliser une gamme de températures plus large pour déterminer les températures optimales de développement in vitro de *P. angolensis*.

En ce qui concerne la pluviométrie, son double rôle a été mis en évidence dans cette étude. La pluie est en effet un facteur important de dissémination et de sporulation de *P. angolensis*. Cependant, il a été démontré que des pluies abondantes ou trop violentes peuvent empêcher l'adhésion des spores à la surface des organes de la plante. Il serait donc intéressant de mener en laboratoire et en milieu réel des essais visant à déterminer les pluviométries optimales pour le développement de la maladie. Ceci amènerait à développer des systèmes d'avertissement pour les producteurs en fonction de la pluviométrie.

En ce qui concerne le sol, les résultats montrent que l'incidence de la maladie a tendance à baisser sur des sols à texture plus sableuse, riches en nutriments et avec un pH plus faible. Ces conditions sont également celles requises pour une bonne croissance des agrumes. Il est donc probable que les conditions de sol favorables au développement des agrumes leur permettent aussi de mieux résister aux attaques de phaeoramulariose. Cependant, les essais de fertilisation n'ont pas donné les résultats escomptés sur la réduction des attaques. Il est possible la structure du sol soit plus importante que sa composition chimique.

### 7.3.2 Influence de la répartition spatiale de la maladie et du système de production

L'analyse de la répartition spatiale de la maladie indique que la répartition de la maladie se fait sous forme d'agrégats, et qu'au-delà de 12 m, il n'y a plus de dépendance spatiale. L'étude de la structure spatiale d'une parcelle agroforestière a mis en évidence la distribution spatiale des agrumes en petits groupes (agrégats) et ces groupes sont séparés les uns des autres par des agrégats d'autres groupes de plantes (forestiers, cacaoyers, palmiers...). Suite à ces deux résultats, nous avons émis deux hypothèses :

1°) La transmission de la maladie d'un agrégat à l'autre n'est pas aisée, mais, au sein d'un agrégat, les conidies peuvent être facilement dispersées par le vent et la pluie.

2°) Le développement de la maladie, toutes conditions étant égales par ailleurs, sera plus facile dans une telle parcelle que dans un verger d'agrumes pur.

En ce qui concerne la première hypothèse, étant donné que le vent et la pluie permettent la dispersion de l'inoculum, et que jusqu'ici on ne connaît pas d'hôtes alternatifs à *P. angolensis*, on peut aisément imaginer que les spores produites par les agrumes malades rencontreront comme obstacles les arbres d'autres familles et ne pourront pas survivre. Cette hypothèse a amené les chercheurs au Kenya à recommander la plantation des brise-vent autour des vergers d'agrumes pour constituer des barrières d'inoculum (Yesuf, 2002).

La deuxième hypothèse est confirmée par l'analyse de régression PLS. En effet, les équations du modèle montrent que plus le pourcentage d'arbres situés en système agroforestier est élevé, plus l'incidence de la maladie baisse dans un site. Le contraire se réalise avec le pourcentage d'arbres situés en vergers purs.

Les systèmes agroforestiers paraissent moins attaqués que les systèmes de cultures pures. D'autres maladies et plus généralement les bioagresseurs voient leurs populations diminuer avec l'augmentation de la biodiversité des populations végétales. Ainsi, il est rapporté que les forêts ayant une plus grande biodiversité sont moins attaquées par les insectes (Jactel & Brockerhoff, 2007) et que les maladies se répandent moins lorsque la biodiversité augmente (Keesing *et al*, 2006). Les systèmes agroforestiers qui se développent au Cameroun dans les zones à vocation cacaoyère, par exemple, devraient donc faire l'objet de recherche pour améliorer leur composition et leur structure afin de définir des optimums tant du point de vue de leur production globale que de leur sensibilité aux bioagresseurs.

### 7.3.3 Influence de l'ombrage

Nos résultats montrent que l'incidence de la maladie est moins élevée sur les agrumes placés sous ombrage que sur ceux en plein soleil. Ils montrent également que l'incidence de la maladie augmente avec une réduction du niveau d'ombrage. Toutefois, l'essai que nous avons mené ne nous permet pas de déterminer un niveau optimal d'ombrage qui permettrait une bonne croissance des agrumes et une diminution significative de l'incidence de la maladie. Il apparaît donc nécessaire à cet effet de mener un essai avec plusieurs niveaux d'ombrages.

Le rôle des arbres d'ombrage a donc été mis en évidence dans cet essai. Cependant, il est difficile de préciser si la diminution de l'intensité de la maladie est dû au rôle de barrière contre le vent et les splash de pluie ou à la diminution de l'intensité de la lumière. La différence d'intensité de maladie notée entre les arbres placés sous ombrage manguiers et ceux placés sous ombrage avocatiers nous amène à penser que l'intensité de la lumière devrait avoir un effet sur le développement du champignon. Des travaux visant à déterminer le rôle de la lumière dans l'épidémiologie devraient être entrepris.

## **7.4 Conclusion et Perspectives**

Le seul moyen de lutte efficace connu contre la phaeoramulariose des agrumes est la lutte chimique. Cependant, le nombre élevé des traitements préconisés, le coût et la disponibilité de ces produits chimiques constituent un frein à leur utilisation par les petits producteurs d'agrumes. Ces derniers sont par ailleurs les principaux fournisseurs d'agrumes sur les marchés africains. La recherche des solutions alternatives à la lutte chimique ou du moins qui contribueraient à sa réduction est donc indispensable. La connaissance des facteurs qui influent sur le développement de cette maladie, objectif de cette étude, constitue une amorce dans la recherche de ces solutions. Cette étude nous a permis de confirmer le rôle de l'altitude, de la température et de la pluviométrie dans l'épidémiologie. Le sol, à travers sa texture et sa composition, joue également un rôle déterminant dans le développement de la maladie. Il en est de même du système de production. En outre, le rôle de l'ombrage a été mis en évidence. La répartition spatiale de la maladie a également pu être étudiée. Les résultats acquis peuvent déjà permettre d'émettre quelques recommandations aux producteurs parmi lesquels (i) l'utilisation des variétés peu sensibles en zone de haute altitude et basse température (mandarinier Beauty ou lime Tahiti) ; (ii) la plantation des agrumes sous ombrage ; (iii) la plantation des agrumes dans des parcelles agroforestières dans lesquelles on aura une alternance des agrumes avec des arbres de différentes familles. Cependant, ce travail a connu plusieurs limites qui méritent d'être évoquées en vue d'une amélioration dans les prochains travaux.

La régression PLS a été effectuée à partir des données provenant de 8 sites, l'estimation des différents paramètres serait peut être meilleure pour un nombre d'observations (sites) plus important (Tenenhaus, 2002). Il est donc nécessaire de continuer les travaux en multipliant le nombre de sites. De plus, il serait plus judicieux d'harmoniser les échelles des différents paramètres. L'incidence de la maladie étant relevée à l'échelle de l'arbre, les paramètres pédoclimatiques devront également être prélevés à la même échelle. Un meilleur dispositif serait obtenu en augmentant le nombre de sites et en diminuant le nombre d'arbres par site tout en respectant la diversité des variétés.

Dans cette étude, nous avons travaillé à l'échelle du site, ce qui nous a permis de prendre en considération un nombre important de facteurs environnementaux. Cette approche nécessite le recours à un vaste échantillon. Cependant, elle ne permet pas de faire un suivi spatio-temporel de la maladie à l'échelle d'un arbre ou d'une parcelle. Les données des interactions entre facteurs à ces petites échelles sont pourtant indispensables pour une meilleure connaissance de l'épidémiologie.

L'épidémie d'une maladie de plante est le résultat de l'interaction entre l'environnement, la plante hôte, l'action de l'homme et l'agent pathogène. La plupart des études épidémiologiques menées sur la phaeoramulariose s'intéressent plus à l'hôte et à son environnement. Les

connaissances acquises sur l'agent pathogène sont peu nombreuses. La biologie du champignon est mal connue. On sait qu'il a un mode de reproduction asexué et présente une faible diversité génétique. Toutefois, la recherche de techniques plus discriminantes que celles utilisées pourrait permettre de déceler des variabilités au sein des populations de ce pathogène. En ce qui concerne l'inoculum primaire, aucune étude n'a été effectuée sur sa quantification et son influence sur le développement de l'épidémie.

L'utilisation de variétés peu sensibles, sur des sols bien drainés, dans des systèmes agroforestiers, devrait toutefois permettre une nette diminution de l'impact de cette maladie dans les bassins de Cameroun.

Ces travaux devront se poursuivre afin d'aboutir à la définition d'une stratégie de lutte raisonnée qui prendra en considération les facteurs de risque et permettra de minimiser l'utilisation des fongicides.

## ***Références bibliographiques***





## Références bibliographiques

- Addinsoft. (2007). XLSTAT version 2011.3.02. Paris France.
- Agostini, J. P., Bushong, P. M., Bahia, A., & Timmer, L. W. (2003a). Influence of environmental factors on severity of citrus scab and melanose. *Plant Disease*, 87, 1102-1106.
- Agostini, J. P., Bushong, P. M., & Timmer, L. W. (2003b). Greenhouse evaluation of products that induce host resistance for control of scab, melanose and Alternaria brown spot of citrus. *Plant Disease*, 87, 69-74.
- Agrios, G. N. (1997). *Plant pathology* (Academic Press ed.). San Diego.
- Ambassa-Kiki R, & Bernard M. (2002). *Testing the applicability of selected methods to evaluate the erodibility index of some Cameroonian soils*. Paper presented at the 3rd International Conference on Land Degradation
- Ambassa-Kiki R, & Nill D. (1999). Effects of different land management techniques on selected topsoil properties of a forest Ferralsol. *Soil and Tillage*, 52, 259-264.
- Anfoka, G. H., Abhary, M. K., Fattash, I., & Nakhla, M. K. (2005). Occurrence and distribution of Citrus Tristeza (CTV) in Jordan Valley. *Phytopathologia Mediterranea* (April 2005).
- Anonyme. (1998). Les agrumes. *Bureau des Ressources Génétiques, plate-forme espèces tropicales et méditerranéennes*
- Anonyme. (2001a). Citrinae classification. EGID-Citrus Network. Janvier 2001. 39p. <http://corsica.corse.inra.fr/sra/egspec2.pdf>
- Anonyme. (2001b). Les problèmes sanitaires et phytosanitaires et l'Accord SPS. Symposium sur les Agrumes. Chine/FAO. 74p
- Anonyme. (2003). *International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides (Revised version)*. Paper presented at the Hundred and Twenty-third Session of the FAO Council.
- Anonyme. (2003). *International Code of Conduct on the Distribution and Use of Pesticides (Revised Version)*. Paper presented at the Adopted by the Hundred and Twenty-third Session of the FAO Council.
- Anonyme. (2004). Information de marché dans le secteur des produits de base. Agrumes. *CNUCED*.

- Anonyme. (2005). *Guidance Document on certain key questions related to import requirements and the new rules on food hygiene and on official controls*. Brussels.
- Anonyme. (2006). Distribution map of Quarantine pests for Europe *Phaeoramularia angolensis*. *EPPO*.
- Anonyme. (2007). Index Fungorum. <http://www.indexfungorum.org/Names/NamesRecord.asp/recordID>,
- Aubert, B. (1988). *Le greening, une maladie infectueuse des agrumes. Stratégies développées à l'île de la Réunion. Circonstances épidémiologiques en Afrique/Asie et modalités d'intervention*. (Paris, France ed.): CIRAD.
- Aubert, B. (1992). Citrus greening disease, a serious limiting factor for citriculture in Asia and Africa. *Proc. Int. Soc. Citriculture*, 2, 817-820.
- Aulong, S., Dury, S., & Temple, L. (2000). Dynamique et structure floristique des agroforêts à agrumes au centre du Cameroun. *Fruits*, 55(2), 103-114.
- Avelino, J. (1999). *Contribution à la gestion du pathosystème Hemileia vastatrix et Coffea arabica au Honduras. Influence des principaux facteurs physiques, phytotechniques et biologiques*. Université de Paris-Sud, Paris.
- Avelino, J., Willocquet, L., & Savary, S. (2004). Effect of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53, 541-547.
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordonez, M., & Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations *Ecological Modelling*, 197, 431 - 447.
- Babin, R. (2009). *Contribution à l'amélioration de la lutte contre le miride du cacaoyer sahlbergella singularis Hagl. (Hemiptera:Miridae). Influence des facteurs agro-écologiques sur la dynamique des population du ravageur.*, Université Montpellier III - Paul Valéry, Montpellier.
- Babin, R., Anikwe, J., Dibog, L., and Lumaret, J. (2011). Effet of cocoa tree phenology and canopy microclimate on the performance of the mirid bug *sahlbergella singularis*. *Entomologia experimentalis et applicata.*, 141 (1) 25-34.
- Bailey, G., Carden, M., Clarke, P., & al, e. (2006). *Mythologie : mythes et légendes du monde entier* (de Lodi ed.). Paris.
- Baillargeon, S. (2005). *Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale des données de précipitations*. Université de Laval, Québec.
- Barkley, N.A., Roose, M.L., Krueger, R.R., & Federici, C.T. (2006). Assessing genetic diversity and population structure in a citrus germplasm collection utilizing simple sequence repeat markers (SSRs). *Theor. Appl. Genet.*,

2006(112), 1519-1531.

- Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems*, 38, 136-164.
- Bella-Manga, Dubois Cecile, Kuate Jean, Mimbimi-Ngbwa Maurice, & Yves, R. J. (1999). Sensibilité à *Phaeoramularia angolensis* de divers d'agrumes cultivés en zone forestière humide du Cameroun. *Fruits*, 54, 167-176.
- Bentley Jeffery W, Boa Eric, & Stonehouse John. (2004). Neighbor Trees: Shade, Intercropping and Cocoa in Ecuador. *Human Ecology*, 32(2).
- Benyahia, H., Jrifi, A., & Lamsettef, Y. (2003). Importance et répartition de la gommose à *Phytophthora* spp. des agrumes au Maroc. *Science Letters*, 5(2),
- Boccas, B., & Laville, E. (Eds.). (1978). *Les maladies à Phytophthora* (IRFA Paris ed.).
- Breeze, T. D., Bailey, A. P., Balcombe, K. G., & Potts, S. G. (2011). Pollination services in the UK: How important are honeybees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3-4), 137-143.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, J. H., & Stone, C. J. (Eds.). (1984). *Classification and regression trees*: Chapman and Hall.
- Brun, J. (1972). La cercosporiose des agrumes provoquée par *Cercospora angolensis*. *Fruits*, 27(7-8), 539-541.
- Brun, J. (1972). La cercosporiose des agumes provoquée par *Cercospora angolensis* *Fruits*, 27(8), 539-541.
- Bushong, P. M., & Timmer, L.W. (2000). Evaluation of postinfection control of citrus scab and melanose with benomyl, fenbuconazole and azoxystrobin. *Plant Disease*, 84, 1246-1249.
- CABI. (2009). Crop Compendium. doi:www.cabi.org/compendia/cpc/
- Chalkley, D. (2011). Systematic Mycology and Microbiology . Invasive Fungi. Angular leaf spot of Citrus - *Pseudocercospora angolensis*. from fungi index.cfm
- Corbaz, R. (Ed.). (1990). *Principes de Phytopathologie et de Lutte contre les Maladies des Plantes*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- De-Rocca-Sierra, & Ollitrault, P. (1992). Les ressources génétiques chez les agrumes. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, 3,
- deVallavieille-Pope, C., Fraj, M. B., Mille, B., & Meynard, J.-M. (2004). Les associations de variétés: accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. Doss de l'environnement de. *Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 30, 101-109.

- Diallo, M. T. S. (2001). Progression de la cercosporiose des agrumes (*Phaeoramularia angolensis*) en Guinée. *Fruits*, 56(1), 37-43.
- Diallo, M. T. S. (2003). Vers une lutte contre la cercosporiose des agrumes en Guinée. *Fruits*, 58(6), 329-344.
- Dirac, M. F., Menge, J. A., & Madore, M. A. (2003). Comparison of seasonal infection of citrus roots by *Phytophthora citrophthora* and *P. Nicotianae* var. *parasitica*. *Plant Disease*, 87, 493-501.
- Dou, H., & Alva, A. K. (1998). Nitrogen uptake and growth of citrus rootstock seedling in a sandy soil receiving different controlled-release fertilizer sources. *Biol. Fertil. Soils*, 26(1998), 169-172.
- Dury, S., & Temple, L. (1999). Diversification of peri-urban small farms toward fruit production in Yaounde (Cameroon). Consequences for the development process and research. *Planetry Garden'99*, 531-535.
- Economos, C., & Clay, W. D. (1998). *Nutritional and health benefits of citrus fruits*. Paper presented at the Twelfth Session of the Intergovernmental Group on Citrus Fruit.
- El Ajjouri, M. E., Satrani, B., Ghanmi, M., Aafi, A., Farah, A., Rahouti, M., et al. (2008). Activité antifongique des huiles essentielles de *Thymus bleicherianus* Pomel et *Thymus capitus* (L.) Hoffm & Link contre les champignons de pourriture du bois d'oeuvre. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12(4), 345-351.
- Emechebe, A. M. (1981). Brown spot of citrus caused by *Phaeoisariopsis* sp. *Annals of applied biology*, 97, 257-262.
- EPPO. (2006). Distribution Maps of Quarantine Pests for Europe.
- Ettema, C.H., & Wardle, D.A. (2002). Spatial soil ecology. *TRENDS in Ecology & Evolution*, 17(4), 177-183.
- FAO. (2001). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*. Rome.
- Faostat. (2011). Division de la Statistique 2011.
- Finck, M.R., Gacek, E.S., Goyeau, H., & al, e. (2000). Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, 20(807-816).
- Goreaud, F. (2000). *Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes*. Thèse, ENGREF Paris.
- Goreaud, F., & Pelissier, R. (1999). On explicit formulas of edge effect correction for Ripley's K-function. *Journal of Vegetation Science* 10(3), 433-438.

- Graham, J. H., & Timmer, L.W. (2003). Phytophthora diseases of citrus.
- Gratton, Y. (2002). le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Institut National de la Recherche Scientifique*
- Griffon, M., & Loeillet, D. (2000). Production et consommation d'agrumes dans le monde. Evolution et Eléments de prospective. *Comptes rendus de l'académie d'agriculture de France*, 86(8).
- Guyot, J., Condima, V., Doaré, F., Cilas, C., & Sache, I. (2010). Segmentation applied to weather-disease relationships in south American leaf blight of the rubber tree. *European Journal of Plant pathology*, 126(3), 349-362.
- Guyot, J., Ntawanga-Omanda, E., Ndoutoume, A., Mba-Otsaghe, A., Enjalric, F., & Ngoua-Assoumou, H. G. (2001). Effect of controlling *Colletotrichum* leaf fall of rubber tree on epidemic development and rubber production. *Crop Protection*, 20(2001), 581-590.
- Harling, R., Shamie, I. M. O., Sesay, S. S., Kamara, A. B., Reeder, R., Boa, E., et al. (2010). First report of *Pseudocercospora angolensis* causing leaf and fruit spot of Citrus in Sierra Leone. *New Disease Reports*, 22. <http://dx.doi.org/10.5197/j.2044-0588.2010.022.001>
- Hyun, J. W., Timmer, L. W., Lee, S.-C., Yun, S.-H., Ko, S.-H., & Kim, K.-S. (2001). Pathological characterization and molecular analysis of *Elsinoe* isolates causing scab diseases of citrus in Jeju Island in Korea. *Plant Disease*, 85, 1013-1017.
- Jagoret, P., Ngogue, H., Bouambi, E., Battini, J. L., & Nyasse, S. (2009). Diversification des exploitations agricoles à base de cacaoyer au Centre Cameroun: mythe ou réalité. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(2), 271-280.
- Javier, F., Espeleta, Eissenstat, D. M., & Graham, J. H. (1999). Citrus root responses to localized drying soil: A new approach to studying mycorrhizal effects on roots of mature trees. *Plant and Soil*, 206(1999), 1-6.
- Jazet, P. M., Tatsadjieu, L. N., Ndongson, B. D., Kuate, J., Zollo, P. H. A., & Menut, C. (2009). Relation between chemical composition and antifungal properties of essential oils of *Callistemon rigidus* and *Callistemon citrinus* of Cameroon against *Phaeoramularia angolensis*. *Journal of Medicinal Plants Research*, 3(1), 009-015.
- Jazet-Dongmo, P. M., Kuate, J., Boyom, F. F., Ducelier, D., Damesse, F., Zollo, P.H. A., et al. (2002). Composition chimique et activité antifongique in vitro des huiles essentielles de citrus sur la croissance mycélienne de *Phaeoramularia angolensis*. *Fruits*, 57(2), 95-104.
- Jactel, H., Brockerhoff, E. G. (2007). Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters*. 10(9),835-848.

- Jeffrey, A., Mcneely, & Schroth, G. (2006). Agroforestry and biodiversity conservation-traditional practices, present dynamics and lessons for the future. *Biodiversity and Conservation*, 2006(15), 549-554.
- Johansson, M. E., & Nilsson, C. (2002). Responses of riparian plants to flooding in free-flowing and regulated boreal rivers: an experimental study. *Journal of Applied Ecology*, 39, 971-986.
- Keesiing, F., Holt, R.D., Ostfeld, R.S. (2006). Effect of species diversity on disease risk. *Ecology letters*, 2006 (9), 485-498.
- Keith, D., Shepherd, M. G., & Walsh. (2002). Development of reflectance Spectral Libraries for Characterization of soil. *Soil Sci. Am.*, 166, 988-998.
- Kirk, P. M. (1986). *Phaeoramularia angolensis*. *Mycopathologia*, 94, 177-178.
- Knobloch, K., Pauly, A., & Iberl, B. (1989). Antibacterial and antifungal properties of essential oil components. *Journal of Essential Oil Res*, 1, 119-128.
- Kuate, J. (1991). La Cercosporiose des Agrumes: *Phaeoramularia angolensis* (de Carvalho & O. Mendes) P. M. Kirk. Evolution de la Maladie sur Fruits en Zone Forestière Humide. Unpublished Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Protection des Végétaux. Centre Universitaire de Dschang/Institut National de Développement Rural.
- Kuate, J. (1997). *La Cercosporiose des Agrumes au Cameroun due à Phaeoramularia angolensis (De Carvalho et Mendes), P.M. Kirk* Epidémiologie, Biologie in vitro du champignon et Relation Hôte-Parasite. Thèse de Doctorat, Université de Dschang (Cameroun).
- Kuate, J. (1998). Cercosporiose des agrumes causée par *Phaeoramularia angolensis*. *Cahier Agriculture*, 7(2), 121-129.
- Kuate, J. (2003). *La Cercosporiose des Agrumes au Cameroun provoquée par Phaeoramularia angolensis : Evaluation de la lutte Chimique et de la sensibilité variétale au champ comme méthode de contrôle*. Unpublished Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies, Communauté de Française de Belgique/Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux
- Kuate, J., Bella-Manga, Damesse, F., Kouodiekong, L., Ndindeng, S. A., David, O., et al. (2006). Enquête diagnostic sur les fruitiers dans les exploitations familiales agricoles en zone humide du Cameroun. *Fruits*, 61(6), 373-387.
- Kuate, J., Bella-Manga, Damesse, F., Rey, J. Y., & Fourre, E. (1994c). Cercosporiose des Agrumes due à *Phaeoramularia angolensis*. Evolution de la maladie en zone forestière humide. *Fruits*, 49(2), 93-101.
- Kuate, J., Bella-Manga, Rey, J. Y., & Fourre, E. (1994a). Symptômes de la cercosporiose des agrumes due à *Phaeoramularia angolensis*. *Fruits*, 49(1),

31-36.

- Kuate, J., Bella-Manga, Rey, J. Y., & Foure, E. (1994b). Symptômes de la cercosporiose africaine des agrumes. *Phaeoramularia angolensis* (De Carvalho & O. Mendes) P.M. Kirk. *CTA*, 19p.
- Kuate, J., Foko, J., Ndindeng, S. A., Jazet-Dongmo, P. M., Fouré, E., Damesse, F., et al. (2006). Effects of essential oils from citrus varieties on *in vitro* growth and sporulation of *Phaeoramularia angolensis* causing citrus leaf and spot disease. *European Journal of Plant pathology*, 2006(114), 151-161.
- Kuate, J., & Fouré, E. (1988). La cercosporiose des agrumes ( *Cercospora angolensis*). Contribution à l'étude épidémiologique dans la zone écologique de Dschang (Cameroun). *Fruits*, 43, 559-567.
- Kuate, J., Fouré, E., Foko, J., Ducelier, D., & Tchio, F. (2002). La phaeoramulariose des agrumes au Cameroun due à *Phaeoramularia angolensis*: expression parasitaire à différentes altitudes. *Fruits*, 54(04), 207-218.
- Kuate, J., Jazet-Dongmo, P. M., Ducelier, D., Damesse, F., Menut, C., & Bessière, J. M. (2003). Effets de la Cercosporiose à *Phaeoramularia angolensis* sur la teneur et la composition chimique des huiles essentielles de peaux d'orange. *Fruits*, 58(3), 143-149.
- Laird, S. A., Leke-Awung, G., & Lysinge, R. J. (2007). Cocoa farms in the Mount Cameroon region: biological and cultural diversity in local livelihoods. *Biodiversity and Conservation*, 16, 2401-2427.
- Lamouroux, N., Pellegrin, F., Nandris, D., Kohler, F. (1995). The Coffea arabica Fungal Pathosystem in New Caledonia: Interactions at two Different Spatial scales. *Journal of Phytopathology*, 143 (7), 403-413.
- Lan Bui Thi Ngoc. (2004). Etude de la diversité génétique de *Phaeoramularia angolensis*, champignon responsable de la cercosporiose des agrumes en Afrique In E.-M. (FRA) (Ed.). Montpellier.
- Landcaster, J., & Downes, B. J. (2004). Spatial point pattern analysis of available and exploited resources. *Ecography*, 27, 94-102.
- Landon, J. R. (1984). *Booker tropical manual: a handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and sub-tropics*, London.
- Landon, J. R. (1991). *Tropical soil manual. A handbook of soil survey and a subtropical agricultural land evaluation in the tropical and* (Longman ed.): Broaker.
- Lepoivre, P. (2003). *Phytopathologie*. Bruxelles: De Boeck & Larcier s.a.
- Loussert, R. (Ed.). (1989). *Les agrumes. 2-Production. Techniques agricoles méditerranéennes*. Paris.

- Luro, F., Rist, D., & Ollitrault, P. (2001). Evaluation of genetic relationships in citrus genus by means of sequence tagged microsatellites. *Acta Hort. (ISHS)*, 546, 237-242. doi:<http://www.actahort.org/books/546/54627.htm>
- Madden, L. V. (2006). Botanical epidemiology: Some key advances and its continuing role in disease management. *European Journal of Plant pathology*, 115, 3-23.
- Mariau, D. (1999). *Les Maladies des Cultures Pérennes Tropicales* (CIRAD ed.).
- Mawussi, G., Vilarem, G., Raynaud, C., Merlina, G., Gbongli, A. K., Wegbe, K., et al. (2009). Chemical composition and insecticidal activity of *Aeollanthus pubescens* essential oil against coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferrari) (Coleoptera:Scolytidae). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 12(3), 327-332.
- McDonald, B. A. (1997). The Population Genetics of fungi: Tools and Techniques *Phytopathology*, 87(4), 448-453.
- McDonald, B. A., & Linde, C. (2002). Pathogen population genetics, evolutionary potential and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 40(349-359).
- McDonald, B. A., & Linde, C. (2002). The population genetics of plant pathogens and breeding strategies for durable resistance. *Euphytica*, 124(2), 163-180.
- Meyonga, G. M. (1971). *Cercospora* fruit and leaf spot of citrus in Cameroon. Response to four fungicidal treatments. Paper presented at the OAU/IAPSC Document 71/28.
- Mila, A. L., Carriquiry, A. L., Zhao, J., & Yang, X. B. (2003). Impact of management practices on prevalence of soybean Sclerotinia stem rot in north-central United States and on farmer's decisions under uncertainty. *Plant Disease*, 87, 1048-1058.
- Miot, S., Frey, P., & Pinon, J. (1999). Varietal mixture of poplar clones: Effect on infection by *Melampsora larici-populina* and on plant growth *European Journal of forest pathology*, 29, 411-423.
- Mouen-Bedimo, J. A., Bieysse, D., Njiayoum, I., Deumeni, J. P., Cilas, C., & Nottéghem, J. L. (2007). Effect of cultural practices on the development of Arabica coffee berry disease, caused by *Colletotrichum kahawae* *European Journal of Plant pathology*, 119, 391-400.
- Nakache, J. P., Vilain, J., & Fertil, B. (1996). Discrimination et régression par une méthode neuromimétique et par la méthode de segmentation CART : application à différentes données et comparaison des résultats *Revue de Statistique Appliquée*, 44, 19-40.
- Ndo, E. (2007). *Analyse du risque épidémiologique des populations d'agrumes vis à vis de la cercosporiose, du scab et de la gommose dans les zones humides du Cameroun.*



Thèse de MSc, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles Université de Dschang.

- Ndo, E. G. D., Bella-Manga, F., Ndindeng, S. A., Nkeng, M. N., Fontem, A. D., & Cilas, C. (2010). Altitude, tree species and soil type are the main factors influencing the severity of *Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus in humid zones of Cameroon *European Journal of Plant pathology*, 2010(128), 385-397.
- Ndzana Abanda, F.X., Quilici, S., Vayssières, J.F., Kouodiekong, L. & Woin N.(2008). Inventaire des espèces de mouches de fruits dans la région de Yaoundé au Cameroun. *Fruits*, 2008 (63), 19-26.
- Nelson, R., Orrego, R., Ortiz, O., Tenorio, J., Mundt, C., Fredrix, M., et al. (2001). Working with Resource -Poor Farmers to Manage Plant Diseases. *Plant Disease*, 85(7), 684-695.
- Ngo Bieng, M.A., Ginistry, C. & Goreaud, F. (2011). Point process models for mixed sessile forest stands. *Annals of Forest Science*. DOI 10.1007/s13595-011-0033-y.
- Newton, A. C., Ellis, R. P., Hackett, C. A., & Guy, D. C. (1997). The effect of component number on *Rhynchosporium secalis* infection and yield in mixtures of winter barley cultivars. *Plant Pathology*, 45, 930-938.
- Newton, A. C., Guy, D. C., Nadziak, J., & Gacek, E. C. (2002). The Effect of Inoculum Pressure, Germplasm Selection and Environment on Spring Barley Cultivar Mixtures Efficacy. *Euphytica*, 125, 325-335.
- Noling, J. W. (2003). Citrus Root Growth and Soil Pest Management Practices 1. Retrieved from <http://edis.ifas.ufl.edu>.
- Ofori-Frimpong, K., Afrifa, A. A., & Acquaye, S. (2010). Impact of shade and cocoa plant densities on soil organic carbon sequestration rates in a cocoa growing soil of Ghana. *African Journal of Environmental Science & Technology*, 4(9), 621-624.
- Olav, S., Olah, D., Svedrud-Thygeson, A., & Odegaard, F. (2011). Predicting hotspots for red-listed species: multivariate regression models for oak-associated beetles. *Insect Conservation and Diversity*, 4, 53-59.
- Ollitrault, P., & Luro, F. (1997). L'amélioration des plantes tropicales. In A. Charrier, J. Michel, H. Serge & N. Dominique (Eds.), (pp. 13-36): CIRAD.
- Palomino, D., & Carrascal, L. M. (2007). Habitat associations of a raptor community in a mosaic landscape of Central Spain under urban development. *Landscape and Urban Planning*, 83(2007), 268-274.
- Parisi, L., Fouillet, V., Schouten, H. J., Groenwold, R., Laurens, F., Didelot, F., et al. (2004). Variability of the pathogenecity of *Venturia inaequalis* in Europe. *Acta Hort.*, 663(1), 107-113.

- Polese, J. M. (2008). La culture des agrumes In Artemis (Ed.) (pp. 93).
- Praloran, J. C. (1971). *Les agrumes. Techniques agricoles et productions tropicales*. G-P Maisonneuve et Larose (Ed.). Paris.
- Pretorius, M. C., Crous, P. W., Groenewald, J. Z., & Braun, U. (2003). Phylogeny of some cercosporoid fungi from Citrus. *Sydowia*, 55, 286-305.
- Rao, M. R., Nair, P. K. R., & Ong, C. K. (1998). Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry systems*, 38, 3-50.
- Rapilly, F. (1991). *L'épidémiologie en pathologie végétale. Mycoses aériennes*. 75007 Paris.
- Ruey-Shyang-Chen, & McDonald, B. A. (1996). Sexual reproduction plays a major role in the genetic structure of populations of the fungus *Mycosphaerella graminicola* *Genetics*, 142(4), 1119-1127.
- Sache, I., (2000). Short-distance dispersal of wheat rust spores. *Agronomy*, 20(2000), 757-767.
- Sally, A. M., Fen, D. B., & Lapaire, C. H. (2009). Plant Disease Diagnostic Capabilities and networks. *Annual Review of Phytopathology*, 7, 15-38.
- SAS Institute, (1987). SAS user's guide: Statistics. Cary: NC.
- Schroth, G. (1999). A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry systems*, 43, 5-34.
- Schroth, G., Krauss, U., Gasparotto, L., Duarte-Aguilar, J. A., & Vohland, K. (2000). Pests and diseases in agroforestry systems of the tropics. *Agroforestry systems*, 50, 199-241.
- Scora, R. W. (1988). *Biochemistry, taxonomy and evolution of modern cultivated citrus*. Paper presented at the VIth International Citrus Congress.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1993). *Phaeoramularia* fruit and leaf spot of citrus with special reference to Kenya. *International Journal of Pest Management*, 39(1), 44-50.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1997). Chemical control of *Phaeoramularia* fruit and leaf spot of citrus in Kenya. *Crop Protection*, 16(2), 141-145.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1998). Some factors affecting infection of citrus by *Phaeoramularia angolensis*. *Journal of phytopathology*, 146(8-9), 385-391.
- Seif, A. A., & Hillocks, R. J. (1999). Reaction of some citrus cultivars to *Phaeoramularia* fruit and leaf spot in Kenya. *Fruits*, 54(3), 23-29.
- Sharville, E. G. (1979). *Plant Disease Control*. Westport, Connecticut (USA).

- Sheperd, K. D., & Walsh, M. G. (2002). Division S-8-Nutrient Management & Soil & Plant Analysis. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am*, 2002(66), 988-998.
- Shibu, J. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Springer science*, 2009.
- Sonwa, D. J., Nkongmeneck, B. A., Weise, S. F., Tchatat, M., Adesina, A. A., & Janssens, M. J. J. (2007). Diversity of plants in cocoa agroforests in humid forest zone of Southern Cameroon. *Biodiversity Conservation*, 16, 2385-2400.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., & Caballero-Nieto, J. (2002). Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry systems*, 55, 37-45.
- Sparks, A. H., Eskes, P. D., Bates, M., Dall'Acqua, W., Guo, Z., Segovia, V., et al. (Eds.), (2008). *The Plant Health Instructor*.
- Spiegel-Roy, P., & Goldschmidt, E. E. (Eds.), (1996). *Biology of citrus*.
- Spreen, T. H. (2001). *Projections de la production et de la consommation mondiales d'agrumes en 2010*. Paper presented at the Symposium sur les agrumes
- Swingle, W. T., & Reece, P. C. (1967). The botany of citrus and its wild relatives . In W. Reuther, L. D. Batchelor & H. J. Webber (Eds.). *The Citrus Industry* (Vol. 1, pp. 130-190): University of California Berkeley.
- Tamesse, J. L., Messi, J., Silatsa-Soufo, E., Kambou, J., Tiago, A. B., Ndongo, A. O., et al. (2002). Complexe des parasitoïdes de *Trioza erytrae* (Del Guercio) (Homoptera:Triozidae), psylle des agrumes au Cameroun *Fruits*, 57, 19-28.
- Tanaka, T. (1961). *Citrologia: semi centennial commemoration papers on citrus studies*. Osaka Japan.
- Temple, L. (1999). *Les marchés des fruits et légumes au Cameroun. Quantification des flux-Analyse des prix*.
- Temple, L. (2001). Quantification des productions et des échanges de fruits et légumes au Cameroun. *Cahier Agriculture*, 10, 87-94.
- Tenenhau, M. (1998). *La Régression PLS. Théorie et Pratique*. Paris.
- Tenenhaus, M. (2008). Component-based Structural Equation Modelling. *HEC School of Management*.
- Tenenhaus, M., Gauchi, J.-P., & Ménardo, C. (1995). Régression PLS et applications. *Revue de Statistique Appliquée* 43(1995), 7-63

- Tenenhaus, M., Pages, J., Ambroisine, L., & Guinot, C. (2005). PLS methodology to study relationship between hedonic judgements and product characteristics. *Food Quality and Preference*, 16(2005), 315-325.
- Tessega, K., Hussien, T., & Sakhuja, P. K. (2006). Management of *Phaeoramularia* fruit and leaf spot disease of citrus in Ethiopia. *Agricultura Tropica et subtropica*, 39(4).
- Thébaud, G., Sauvion, N., Chadoeuf, J., Dufils, A., & Labonne, G. (2006). Identifying risk factors for European stone fruit yellows from a survey. *Phytopathology*, 96(890-899).
- Timmer, L. W., & Menge, J. A. (1988). Phytophthora-Induced Diseases. In A. P. Society (Ed.), *Compendium of Citrus Diseases*. USA: St Paul.
- Torquebiau, E. (2007). *L'agroforesterie : des arbres et des champs* (L'Harmattan ed.). Paris.
- Tucker, S. L., & Talbot, E.J. (2001). Surface Attachment and Pre-Penetration Stage development by Plant Pathogenic Fungi. *Annu. Rev. Phytopathol.* 39(385-417).
- Van-Ee, S. (2005). *La culture fruitière dans les zones tropicales*. Wageningen.
- Walali-Loudyi, D. E. M., Skiredji, A., & Hassan, E. (2003). Fiches techniques : le bananier, la vigne, les agrumes. In T. d. t. e. agriculture (Ed.). Rabat: Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II.
- Walsh, M. G. (2002). Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 988-998.
- Walter, J.-M. N. (2006). *La méthode de Ripley pour l'analyse des structures spatiales ponctuelles en écologie*. Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Westphal, E., Embrechts, J., Ferweda, J. D., van-Gils-Meeus, H. A. E., Mutsaers, H. W., & Wesphal-Stevens, J. M. C. (1985). *Cultures vivrières tropicales avec référence spéciale au Cameroun*. Wageningen, Netherlands.
- Wolfe, M. S. (1985). The current status and prospects of multiline cultivars variety mixtures for disease resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 23, 251-273.
- Wolfe, M. S. (2000). Crop strength through diversity. *Nature* 406(17 August 2000), 681-682.
- Yesuf, M. (2002). *Phaeoramularia leaf and fruit spot of citrus: A major threat to citrus production in tropical Africa, present status and future perspectives*. Paper presented at the Horticulture Seminar on Sustainable Horticultural Production in the tropics Jomo Kenyatta University of Agriculture Technology Juja Kenya.

- Yesuf, M. (2007). Distribution and management of phaeoramularia leaf and fruit disease of citrus in Ethiopia. *Fruits*, 99-102.
- Zadocks, J.C., Schein R.D. (1979). Epidemiology and plant disease management. *Oxford Univ. Press, New york/Oxford*. 427pp.
- Zadocks, J. C. (2001). Plant Disease Epidemiology in the Twentieth Century. A Picture by Means of Selected Controversies *Plant Disease*, 85(8), 808-816.



***Annexe***





## **Annexe : Effets de différentes applications de l'urée sur l'incidence de la phaeoramulariose**

### **4.1 Introduction**

L'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K) sont les nutriments primaires qui manquent le plus dans le sol à cause de leur utilisation en grandes quantités par les plantes pour leur croissance et survie. Des relations entre la fertilisation et l'augmentation ou la diminution de l'apparition de maladies des plantes sont certes connues, mais encore inexplorées dans le détail. On ignore en grande partie si et comment l'alimentation a un effet d'agression dans le sol ou sur la plante (en application foliaire).

En général, il est admis qu'une plante suffisamment approvisionnée en éléments nutritifs ne manifeste pas de stress d'alimentation et peut ainsi mieux tolérer, dans une certaine mesure, d'autres situations de stress comme par exemple le froid, le manque d'eau ou des attaques pathogènes comparativement à une plante mal alimentée.

Parmi ces trois éléments nutritifs majeurs, l'azote est celui qui manifeste le plus un effet de stress. Il a ainsi été démontré qu'une alimentation en azote élevée et pratiquée isolément favorise une attaque par des pathogènes. Ceci vaut pour les maladies mais souvent aussi pour des attaques parasitaires. Pour cet effet négatif, on cite comme causes :

une croissance prolongée, des tissus turgescents lâches, à parois minces avec de larges espaces intercellulaires, et conditionnés par une densité,  
une humidité relativement élevée dans la culture,  
des constituants internes solubles contenant une proportion plus élevée en azote.

Il est possible que la diminution de la teneur en certains constituants phénoliques internes influence négativement les réactions de défense de la plante. Pourriture (molle) de la feuille et de la tige de la pomme de terre, oïdium des céréales et des fruits, rouille des céréales, tavelure de la pomme, pucerons, viroses sont des exemples de l'influence de l'azote.

Les effets de l'azote sur le développement de la phaeoramulariose des agrumes sont mal connus. Au cours d'une enquête épidémiologique réalisée dans les principaux bassins de production d'agrumes au Cameroun (Ndo, 2010), le type de sol est apparu comme un des principaux facteurs de risque de développement de la maladie. Toutefois, aucune analyse de sol n'avait été effectuée, de sorte que l'on ignore si ce risque est lié à la composition chimique ou à la texture des sols. A l'issue de cette enquête, les analyses de sols ont été effectuées sur les horizons 0-20 et 40-60 des différents sols des sites de l'étude (cf Chapitre 3).

Les résultats montrent des taux très faibles d'azote ( $<0.2\%$ ) aux deux horizons dans tous les sites sauf Jakiri à l'horizon 0-20 (0.61%) et Boumnyebel à l'horizon 40-60 (1.39%). En prenant en considération le rôle joué par les apports en azote sur le développement des bioagresseurs, cette étude se propose de déterminer l'effet de différentes applications de l'urée (46% d'azote) sur l'incidence de la phaeoramulariose des agrumes sur plusieurs types de sols présents dans les bassins de production d'agrumes du sud Cameroun.

## **4.2 Matériel et méthodes**

### **4.2.1 Choix des sites**

Pour intégrer la variabilité des différents types de sol dans les bassins de production d'agrumes, 5 sites ont été choisis. Il s'agit des sites de Boumnyebel (latitude 4°03N, longitude 10°58E, altitude 393 m), Bokito (latitude 3°38N, longitude 11°09E, altitude 488 m), Jakiri (latitude 6°04N, longitude 10°39E, altitude 1571 m), Kumba (latitude 4°45N, longitude 9°29E, altitude 300 m) et Njombé (latitude 4°34N, longitude 9°38E, altitude 92 m). Une parcelle a été choisie dans chacun des sites.

### **4.2.2 Choix de l'espèce**

Les orangers ont été choisis pour mener cet essai. Ce choix est lié non seulement à la sensibilité de cette espèce vis-à-vis de la phaeoramulariose, mais aussi à sa présence dans tous les sites choisis de cette espèce d'agrumes.

### **4.2.3 Dispositif expérimental**

L'essai consistait en 3 traitements, soit 2 types d'apport d'azote et un témoin sans azote. Le premier apport consistait en une dose de 750 g d'urée (46% d'azote) par arbre et par an appliqué en une seule fois. Le deuxième traitement avec la même dose d'urée fractionnée en 3 et apportée tous les 4 mois.

Le fertilisant a été appliqué sur un anneau d'environ 1 m de large, tout autour du tronc. La distance respectait la longueur des branches les plus grandes, elle n'était donc pas identique d'un arbre à l'autre.

Les premières observations se sont faites sur la pousse foliaire suivant les premiers apports d'azote. Dix pousses ayant chacune un minimum de 4 feuilles ont été choisies sur chaque arbre. Le nombre de lésions présentes sur chaque feuille était noté. Les observations se font au moment où les organes ont dépassé la période de grande sensibilité (après 8 semaines). Pour cet essai, huit parcelles ont été choisies dans les bassins de Bokito (3), Jakiri (2), Njombé (1), Kumba (1) et Boumnyebel (1). Le tableau ci-après résume le nombre d'arbres et d'espèces par parcelle et les traitements apportés. Les coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude) ont été prises à l'aide d'un GPS.

**Tableau 4.1.** Récapitulatif du dispositif expérimental dans les différents sites d'essai de l'effet de différentes applications de l'urée sur l'incidence de la phaeoramulariose.

Sites	Traitement	Nombre d'arbres
Bokito	Dose unique d'urée (750 g)	10
	Dose fractionnée d'urée x 3 (250 g)	10
	Témoin sans urée	10
Jakiri	Dose unique d'urée (750 g)	12
	Dose fractionnée d'urée x 3 (250 g)	12
	Témoin sans urée	12
Njombé	Dose unique d'urée (750 g)	6
	Dose fractionnée d'urée x 3 (250 g)	6
	Témoin sans urée	6
Kumba	Dose unique d'urée (750 g)	6
	Dose fractionnée d'urée x 3 (250 g)	6
	Témoin sans urée	6
Boumnyebel	Dose unique d'urée (750 g)	4
	Dose fractionnée d'urée x 3 (250 g)	4
	Témoin sans urée	4

#### 4.2.4 Collecte des données

A chaque série d'observation, 10 pousses étaient choisies sur chaque arbre de façon aléatoire. Le choix se faisait de manière à avoir une bonne représentation symétrie de l'arbre (sommet, bas, gauche, droite, centre). Sur chacune des 10 pousses choisies, les 16 premières feuilles au maximum étaient sélectionnées en partant du bas vers le sommet de la pousse. Dans la même optique, sur chaque arbre, 40 fruits répartis équitablement sur les différentes branches de l'arbre étaient choisis. Les observations consistaient au comptage du nombre de lésions dues à la phaeoramulariose par feuille et par fruit.

La collecte des données dans les parcelles de l'IRAD et les parcelles paysannes s'est faite pendant 4 saisons fruitières successives (de septembre 2009 à mai 2011). Les données ont été collectées une fois par saison et par parcelle (septembre-octobre 2009 ; mai-juin 2010 ; janvier-février 2011 ; mai-juin 2011). Ces 4 saisons représentent les 4 dates d'observation. Elles sont non seulement des saisons de pluies (sauf la date 3) et des saisons fruitières, mais aussi des périodes de grande intensité de la maladie (Kuate, 2003).

Pour évaluer la sévérité, nous avons le nombre moyen de lésions par feuille/fruit pour chaque arbre (Nles) et le nombre moyen de lésions par feuille/fruit malade et par arbre (Nlesm). Le Nlesm permet de connaître le degré de sévérité réel sur les organes qui présentent des symptômes. L'incidence de la maladie est donnée par la proportion d'organes malades (Pom). Ces organes sont des feuilles ou des fruits. Le Pom se calcule par le rapport : nombre total de feuilles /fruits malades sur nombre total de feuilles/fruits observés x 100.

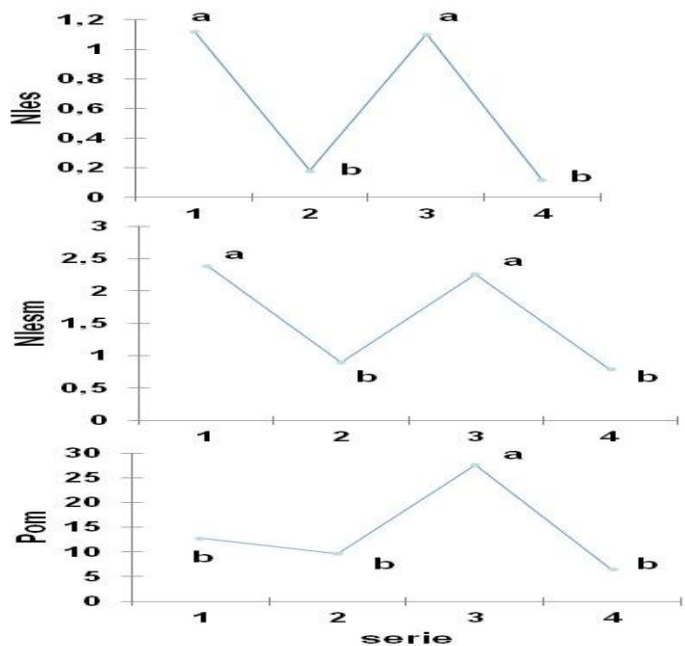
#### 4.2.5 Analyses de variance

L'analyse des variances s'est faite avec le logiciel SAS version 9.2. Elle a été effectuée en utilisant la procédure GLM (modèle linéaire général). L'analyse de variance nous a permis de comparer les 4 dates d'observation afin de déceler si l'intensité de la maladie variait avec la période d'observation. Elle nous a également permis de comparer au sein de chaque site les différents traitements en fonction des variables de la maladie. Le test de Student-Newman-Keuls au seuil de probabilité 5% a été utilisé à chaque fois pour comparer les différentes moyennes.

### 4.3 Résultats

#### 4.3.1 Comparaison des dates d'observation

La comparaison des dates d'observation a permis de déterminer si certaines dates présentaient des résultats identiques ( $p=5\%$ ), auquel cas la présentation des résultats pour toutes les dates serait superflue. Entre les dates 2 et 4, il n'a été décelé aucune différence significative pour toutes les variables de la maladie (Figure 3.9). Il en est de même entre la date 1 et la date 3, pour les variables Nles et Nlesm. Pour la variable Pom, des différences significatives ont été trouvées entre les dates 1 et 3, mais la date 1 n'est pas significativement différente de la date 2 et 4 pour cette variable. Au vu de ce qui précède, nous nous proposons de présenter les résultats uniquement pour les dates 2 et 3.



Nles : nombre moyen de lésion par feuille/fruit ; Nlesm : nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade ; Pom : pourcentage d'organes malades. Les moyennes suivies de mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil 5% par le test de Student-Newman-Keuls

**Figure 4.1.** Comparaison des 4 dates d'observation par rapport aux variables de la maladie (Nles, Nlesm et Pom).

### 4.3.2 Analyse de corrélation entre les variables de la maladie

Une analyse de corrélation a été effectuée entre les 3 variables de la maladie et les résultats montrent des corrélations positives et  $>0.7$  entre les 3 variables (Tableau 4.2) Ce résultat montre que les 3 variables évoluent dans le même sens. Aussi, dans cette étude, nous ne présenterons que les résultats sur Pom.

**Tableau 4.2.** Matrice de corrélation entre les 3 variables de la maladie.

Variables	Nles	Nlesm	Pom
Nles	1,000	0,891	0,790
Nlesm	0,891	1,000	0,707
Pom	0,790	0,707	1,000

Nles : nombre moyen de lésion par feuille/fruit ;

Nlesm : nombre moyen de lésion par feuille/fruit malade;

Pom : pourcentage d'organes malades

### 4.3.3. Comparaison de l'incidence de la maladie entre les différents traitements pour chaque site

Pendant les deux dates, aucune différence significative n'a été observée entre les 3 traitements sur feuilles et sur fruits quel que soit le site.

**Tableau 4.3.** Incidence de la Phaeoramulariose pour chacun des trois traitements de nutrition azotée dans les 5 sites d'étude.

Dates	Sites	Pom feuilles			Pom fruits		
		Traitements					
		1	2	3	1	2	3
2	Bokito	1.2±3.9a	2.1±5.1a	3.1±7.5a	11.0±15.2a	1.6±2.8a	8.6±10.4a
	Boumnyebel	5.1±7.0a	2.8±5.7a	5.6±7.0a	9.40±18.8a	0.0±0.0a	0.6±1.3a
	Jakiri	8.0±12.5a	9.0±10.6a	5.4±10.1a	54.1±26.8a	31.3±31.8a	41.9±33.3a
	Kumba	30.4±13.7a	41.3±19.0a	33.0±15.2a	55.3±25.2a	62.9±22.3a	48.9±28.8a
	Njombé	0.9±1.0a	0.4±0.7a	0.4±0.9a	0.0±0.0a	0.4±1.0a	0.4±1.0a
3	Bokito	13.2±23.1a	4.7±11.8a	9.9±17.7a	1.2±2.6a	9.6±30.0a	8.3±26.5a
	Boumnyebel	0.0±0.0a	0.0±0.0a	0.0±0.0a	2.5±5.0a	10.4±12.5a	10.0±20.0a
	Jakiri	39.7±16.9a	37.0±15.9a	31.1±23.9a	36.0±30.4a	39.5±33.6a	27.7±31.8a
	Kumba	63.2±25.4a	80.7±20.3a	68.8±28.2a	77.1±29.2a	72.1±40.6a	42.7±41.9a
	Njombé	10.1±5.3a	7.6±8.8a	10.3±6.1a	13.3±11.4a	20.8±16.1a	17.9±15.8a

## 4.4 Discussions

Aucune différence significative n'a été enregistrée entre les différents traitements pendant les 4 dates d'observation (2 années). Ces résultats nous amènent à penser que les apports d'azote sur les arbres ne jouent aucun rôle déterminant sur le développement de la phaeoramulariose. Ce résultat confirme également celui obtenu au précédent chapitre dans lequel le taux d'azote ne se retrouvait pas parmi les variables importantes qui déterminent le niveau de la maladie.

L'absence de différence entre les différents traitements peut s'expliquer par le fait que les apports d'azotes ne sont pas directement utilisés par les nouveaux organes. Des études ont montré que le développement de nouveaux organes requiert la mobilisation de l'azote dans les organes de réserve (feuilles, racines, branches, tronc). En effet, les nouveaux organes sont constitués de plus de 70% de l'azote issu de stocks des organes de réserve (Legaz et al, 1995). Les réserves d'azote contenues dans ces tissus matures jouent donc un rôle plus important que les apports par fertilisation (Dasberg, 1987). Le but de la fertilisation est donc plus d'assurer un bon développement de l'arbre que la production des fruits ou des feuilles au moment où cette dernière est effectuée. En deux ans de fertilisation azotée, il est difficile de voir le résultat des apports au niveau de la production, surtout lorsqu'il s'agit d'apports au niveau du sol. En effet, les apports d'azote au niveau du sol sont généralement suivis de pertes par lessivage (He et al, 1999). Les apports foliaires d'urée sont de plus en plus privilégiés car ils permettent d'éviter le lessivage. Ils permettent également un maximum d'absorption de l'azote par les jeunes feuilles (Bondada et al, 2001).

Il serait donc judicieux de continuer les différents traitements afin d'observer sur les fruits et feuilles la différence liée aux apports d'azote.

## Abstract

*Phaeoramularia* leaf and fruit spot disease of citrus (PLFSD) caused by *Pseudocercospora angolensis* is one of the most serious diseases which attacks citrus in tropical Africa. It also constitutes a threat for the other producer countries located in tropical zone. Chemical treatment is the only method used for effective control of this disease. However, in addition to causing ecological problems, this method lies beyond the reach local smallholders. The development of ecologically friendly strategies to ensure effective protection of citrus against *P. angolensis*, is thus necessary. To this end, a knowledge of PLFSD risk factors is pre-required. The purpose of this study was to specify, by means of a survey and experiments carried out in natural conditions, the effects of certain biotic and abiotic factors on the development of the disease. The survey was carried out in 39 sites belonging to 13 citrus production basins of the humid zones of Cameroon and targetted a collection of environmental and biological tree characteristics as well as a focus on the most epidermiologically important ones. Experiments on 8 sites enabled a confirmation and evaluation of suspected factors. A stepwise logistic regression analysis of survey data made it possible to target altitude, soil type, citrus species and vegetation type as main factors influencing disease development. Relations between these factors and disease incidence are illustrated in segmentation trees which define the levels of disease according to the evolution of these factors. Experiments confirmed the great sensitivity of grape fruit and orange trees to PLFSD while tangerine and Tahiti lime trees were less sensitive. Disease incidence increased with a rise in altitude and a reduction in temperature and rainfall. Soil texture (clay, sand and silt contents) proved to be more determinant in disease development than its chemical composition. The role of nitrogen fertilization was not demonstrated in disease epidemiology while the effect of shade was significant. An experimentation showed that trees planted under shade are less affected than those located in sunshine and increase in shade intensity conferred a reduction of disease incidence. A spatial structure analysis of the disease made it possible to highlight an aggregate structure indicating small scale disease dispersion. An analysis of the spatial structure of an agro\_forestry farm showed an aggregate structure of the sub populations of constituent tree families. This structure suggested that the dispersion of PLFSD within such a farm would be limited between the various citrus aggregates. PLS regression analysis suggested that several of these parameters play a determinant role in contributing to the development of disease on grape fruit, orange trees and Satsuma mandarin trees. All results indicate the need for developing parameter specific strategies for controlling the disease. The development of integrated agro forest systems which enable a decrease of the pressure of pest and diseases is envisaged.

Key-words: *Pseudocercospora angolensis*, leaf and fruit spot disease, citrus, epidemiology, risk factors

## Résumé

La Phaeoramulariose des agrumes (*Pseudocercospora angolensis*) est une des maladies les plus graves qui attaque les agrumes en Afrique tropicale. Elle constitue aussi une menace pour les autres pays producteurs situés en zone tropicale. La lutte chimique est le seul moyen de lutte efficace connu contre cette maladie. Cependant cette méthode de lutte, en plus de créer des problèmes écologiques, n'est pas adaptée aux moyens des petits producteurs de cette zone. La mise en place de stratégies permettant de minimiser l'emploi de fongicides tout en assurant une protection efficace des agrumes contre *P. angolensis* est donc nécessaire. La connaissance des facteurs de risque de la phaeoramulariose est une étape préliminaire à cette démarche. Le travail entrepris avait pour but de préciser, à l'aide d'une enquête et des expérimentations menées en conditions naturelles, les effets de certains paramètres biotiques et abiotiques sur le développement de la maladie. L'enquête a été effectuée dans 39 sites appartenant à 13 bassins de production des agrumes de la zone humide du Cameroun. Elle a permis de recenser les facteurs pédoclimatiques et biologiques dans l'environnement des arbres et de retenir les plus importants intervenant dans l'épidémiologie. Les expérimentations sur 8 sites ont permis de confirmer et d'évaluer les paramètres retenus après l'enquête. L'analyse de régression logistique des données issues de l'enquête a permis de cibler l'altitude, le type de sol, l'espèce d'agrumes et le type de végétation environnant les agrumes comme principaux facteurs favorisant le développement de la maladie. Les relations entre ces facteurs et l'incidence de la maladie sont illustrées dans les arbres de segmentation qui définissent les niveaux de maladie en fonction de l'évolution de ces paramètres. Les expérimentations ont confirmé la grande sensibilité des pomélos et orangers vis-à-vis *P. angolensis*. En revanche, les mandariniers et la lime Tahiti se sont avérés moins sensibles. L'incidence de la maladie augmente avec une élévation en altitude, une diminution de la température et dans une moindre mesure de la pluviométrie. La texture du sol (taux d'argile, de sable et de limon) s'est avérée plus déterminante du niveau de la maladie que sa composition chimique. Le rôle de la fertilisation azotée n'a pas été mis en évidence dans le développement de la maladie. Par contre celui de l'ombrage s'est avéré déterminant. Une expérimentation a montré que les arbres plantés sous ombrage sont moins affectés que ceux situés en plein soleil et l'augmentation de l'intensité de l'ombrage entraîne une diminution de l'incidence de la maladie. L'analyse de la structure spatiale de la maladie a permis de mettre en évidence une structure agrégée indiquant la dispersion de la maladie à petite échelle. La description de la structure spatiale d'une parcelle agroforestière a mis en exergue la structure agrégée des différentes sous-populations de familles d'arbres qui la composent. Cette structure a donné à penser que la dispersion de la phaeoramulariose au sein d'une telle parcelle serait limitée entre les différents agrégats d'agrumes. L'analyse de régression PLS a permis d'attribuer un rôle déterminant à plusieurs de ces paramètres et de déceler des différences entre les paramètres contribuant au développement de la maladie sur pomélos, orangers et mandariniers Satsuma. L'ensemble des résultats acquis indique la nécessité de développer des stratégies de lutte en fonction de ces paramètres. La possibilité d'une conception des systèmes agroforestiers raisonnés permettant de diminuer la pression des bioagresseurs est envisagée.

**Mots-clés :** *Pseudocercospora angolensis*, Phaeoramulariose, agrumes, épidémiologie, facteurs de risque